

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Российский университет транспорта»  
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи



ПРОНЕВИЧ ОЛЬГА БОРИСОВНА

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНЫМИ  
РИСКАМИ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами (транспорт)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Шубинский Игорь Борисович

Москва – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ИНСТРУМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНЫМИ РИСКАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ .....	13
1.1 Состояние системы управления пожарными рисками на железнодорожном транспорте.....	18
1.2 Нормативное обеспечение методологии оценки пожарных рисков в Российской Федерации .....	24
1.3 Оценка пожарных рисков в странах Европы и Америке .....	37
1.4 Обзор существующего программного обеспечения для диагностики пожароопасных состояний и оценки пожарных рисков .....	39
1.5 Методы оценки рисков на железнодорожном транспорте .....	47
1.6 Постановка задачи научного исследования .....	49
ГЛАВА 2. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОЖАРНЫХ РИСКОВ НА ОБЪЕКТАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА.....	55
2.1 Способ математического моделирования появления пожарного риска объекта железнодорожного транспорта на стадии его эксплуатации .....	55
2.2 Концепция оценки рисков на стационарных и передвижных объектах железнодорожного транспорта .....	64
2.3 Апостериорная оценка пожарного риска объектов железнодорожного транспорта.....	69
2.4 Априорная оценка пожарного риска на стационарных и передвижных объектах железнодорожного транспорта на основе результатов диагностики ...	92
ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНЫМИ РИСКАМИ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ .....	113
3.1 Методы и цели аудита пожарной безопасности .....	114

3.2 Анализ и оценка состояния пожарной безопасности на железнодорожном транспорте. Методы анализа и классификация пожароопасных состояний .....	117
3.3 Автоматизированная диагностика и управление состояниями объектов железнодорожного транспорта, влияющими на пожарную безопасность.....	142
3.4 Автоматизация аудита пожарной безопасности стационарных и передвижных объектов железнодорожного транспорта .....	149
ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ.....	161
4.1 Оценка пожарных рисков на стационарных объектах ОАО «РЖД».....	161
4.2 Мобильный программно-аппаратный комплекс для аудита пожарной безопасности железнодорожного вокзала .....	174
4.3 Оценка пожарных рисков на тяговом подвижном составе.....	180
4.4 Мобильный программно-аппаратный комплекс для оценки пожарных рисков тягового подвижного состава .....	185
4.5 Достоверность научных положений и результатов диссертационной работы.....	190
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	196
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	198
Приложение А Результаты статистических исследований и экспертных оценок пожарной опасности объектов железнодорожного транспорта.....	215
Приложение Б Матрицы пожарных рисков стационарных и передвижных объектов ОАО «РЖД» .....	230
Приложение В Классификаторы и контрольно-оценочные карты неисправностей стационарных и передвижных объектов железнодорожного транспорта, влияющих на величину пожарного риска.....	239
Приложение Г Пример графа состояний пожарной опасности кабелей в помещении стационарного объекта и расчета вероятностей перехода в опасное состояние.....	250

Приложение Д Выдержки из патента на изобретение «Способ определения пожарной опасности технических объектов железнодорожного транспорта и система для его реализации».....	256
Приложение Е Акты внедрения результатов диссертационного исследования...	259

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** На безопасность перевозочного процесса на железнодорожном транспорте (ЖДТ) оказывают влияние ряд дестабилизирующих факторов. Среди них значительное влияние, наряду с отказами технических средств и технологическими нарушениями, оказывают события возникновения пожароопасных состояний инфраструктуры и подвижного состава. В 2014 году пожар был отнесен к событиям, связанным с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации ЖДТ (Положение о классификации, порядке расследования и учета транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, утв. Приказом Минтранса России от 18.12.2014 N 344). К 2019 году, с развитием практики оценки рисков в ОАО «РЖД», пожар вошел в реестр рисков нарушения безопасности движения как один из внутренних/основных видов риска. В настоящее время в ОАО «РЖД» следует единовременно парировать риски возникновения пожароопасных состояний более 14 000 локомотивов, а также сотен стационарных объектов. Временные затраты на устранение неисправностей – причин возгораний, тем более, на ликвидацию последствий пожаров, приводят к длительным задержкам в движении поездов и, как следствие, – к существенным финансовым потерям компании. Разовый ущерб от пожара на подвижном составе достигает 30 млн. рублей.

Для поддержания бесперебойного перевозочного процесса на ЖДТ необходима система предотвращения появления дестабилизирующих безопасность состояний объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, которые приводят к возникновению пожаров. Ее основой должна стать автоматизированная система управления пожарными рисками, позволяющая на основании результатов оперативного прогноза риска, принимать решение о необходимости ремонта, технического обслуживания или замены потенциального источника огня (ПИО) с целью минимальной задержки

перевозочного процесса. Под пожарным риском в рамках исследования понимается риск возникновения пожароопасной ситуации.

**Степень разработанности темы исследования.** Большая часть исследований пожарных рисков проводилась институтами Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. Основными задачами этих исследований были расчет вероятности успешной эвакуации людей и оценка социальных рисков. Существенный вклад в эти исследования внесли Клепенко Е.А., Костерин И.В., Швырков С.А., Шевчук А.П. Построением автоматизированных систем управления сигнализацией и тушением пожара занимались Кучера Л.Я., Цветков Р.Е., Шарафутдинов А.А. и др.

На ЖДТ не менее актуальна задача автоматизированного управления пожарными рисками на объектах, для которых нехарактерно массовое пребывание людей, но при этом важно минимизировать вероятности возгорания объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, обеспечивающих непрерывность перевозочного процесса. Однако в отечественных исследованиях, известных автору, не получили широкого распространения методы оценки пожарных рисков на основе анализа фактического состояния ПИО.

В европейских странах популярны методы индексной оценки пожарного риска, в основе которых лежит метод Гретенера. Общей чертой большинства методов индексной оценки рисков является превалирование в моделях факторов, зависящих от вида деятельности, реализуемой в помещении (на объекте), а не от состояния технических средств, являющихся ПИО.

Интеллектуализация процессов управления пожарными рисками за счет математического моделирования процессов, приводящих к изменению вероятности появления пожара позволит снизить количество случаев пожара. Автоматизация системы управления пожарными рисками обеспечит возможность единовременной оценки множества объектов и формирования перечня и плана корректирующих мероприятий по снижению пожарных рисков.

**Объект исследования** – объекты инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, реализуемые на них производственные процессы, а также автоматизированные системы управления пожарными рисками.

**Предмет исследования** – автоматизированная система управления пожарными рисками на объектах ЖДТ, методы и модели оценки пожарных рисков объектов, способы и инструменты автоматизированной диагностики и прогнозирования пожарных рисков при обеспечении безопасности перевозочного процесса.

**Цель и задачи.** Целью диссертации является снижение количества опасных состояний, приводящих к пожарам и повышение безопасности движения за счет автоматизации процессов управления пожарными рисками объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ.

В соответствии с этой целью были поставлены следующие теоретические и практические задачи:

— Анализ состояния проблемы оценки и управления пожарными рисками на объектах ЖДТ, видов автоматизированных систем управления пожарными рисками.

— Математическое моделирование пожарного риска объекта ЖДТ на стадии его эксплуатации.

— Разработка алгоритмов автоматизированного диагностирования неисправностей объектов ЖДТ, которые приводят к пожарным рискам этих объектов.

— Интеллектуализация процессов управления пожарными рисками объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ на основе их фактических состояний.

— Разработка мобильного программно-аппаратного комплекса для автоматизированного управления пожарными рисками объектов ЖДТ.

— Апробация автоматизированной системы управления пожарными рисками на стационарных и передвижных объектах инфраструктуры и подвижного состава ОАО «РЖД».

**Научная новизна** результатов, полученных в результате выполнения диссертационного исследования, заключается в следующем:

1. Выявлены основные неисправности, дестабилизирующие пожарную безопасность инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ на этапе их эксплуатации, сформулированы принципы оценки пожарных рисков, позволяющие ранжировать объекты одного функционального назначения и одинаковых конструкций.

2. Разработаны алгоритмы диагностирования неисправностей объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, позволяющие для каждого объекта выявлять пожарные риски.

3. Предложен и обоснован метод описания изменения состояний объектов ЖДТ с помощью ориентированного графа для определения путей перехода и вероятностей возникновения пожарных рисков.

4. Предложен комплекс методик интеллектуализации процессов управления пожарными рисками объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, позволяющих оценивать реальные уровни пожарных рисков, принимать решения о допуске объектов к эксплуатации, а также формировать корректирующие мероприятия для снижения пожарных рисков.

5. Предложены принципы построения и алгоритмы функционирования мобильного программно-аппаратного комплекса для диагностирования и прогнозирования пожарных рисков на объектах ЖДТ, отличающегося возможностью оперативной оценки рисков этих объектов с учётом условий эксплуатации.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

— Разработан метод описания процессов возникновения и развития пожароопасных ситуаций на объектах инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ до появления открытого горения. В основе метода лежат статистические и экспертные оценки вероятностей изменения фактического состояния объекта ЖДТ на стадии эксплуатации.

— Разработаны способы и алгоритмы автоматизированного аудита пожарной опасности ПИО на объектах инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, впервые позволяющие собирать исходные данные для оценки пожарных рисков без привлечения сотрудников надзорных органов.

— Разработан графовый метод прогнозирования вероятности возникновения пожароопасного состояния для оценки пожарных рисков на объектах инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ.

— Разработана совокупность моделей управления и методик оценки пожарных рисков объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ.

— Разработаны классификаторы и контрольно-оценочные карты неисправностей объектов ЖДТ, влияющих на пожарные риски объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, позволяющие проводить аудит их пожарных рисков без привлечения надзорных органов.

— Разработан мобильный программно-аппаратный комплекс, позволяющий оперативно проводить аудит и оценку пожарных рисков объектов ЖДТ.

— На железнодорожных вокзалах, постах электрической централизации, в информационно-вычислительных центрах ОАО «РЖД», на тепловозах и электровозах ОАО «РЖД», тяговых подстанциях ОАО «РЖД» проведены расчёты пожарных рисков для 425 стационарных объектов и 806 передвижных объектов ЖДТ. Результаты расчётов пожарных рисков использованы при построении планов технического обслуживания объектов ЖДТ и легли в основу принятия решения о допусках объектов ЖДТ к эксплуатации.

**Методология и методы исследования.** В работе использованы методы и модели анализа и оценки надежности и функциональной безопасности систем, методы теории вероятности, методы теории графов, методы теории нечетких множеств, методы оценивания рисков, методы теории экспертных оценок, методы теории игр.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Классификация неисправностей объектов ЖДТ, дестабилизирующих пожарную безопасность инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ и контрольно-оценочные карты как инструмент, обеспечивающие интеллектуализацию процесса выявления пожароопасных состояний, а также выбора контролируемых характеристик пожароопасных узлов объектов ЖДТ.

2. Метод математического моделирования пожарных рисков объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ на стадии эксплуатации, отличающийся от известных возможностью априорной оценки вероятностей возникновения пожароопасных состояний.

3. Способ и алгоритмы интеллектуализации выявления неисправностей объектов ЖДТ, приводящих к пожарным рискам, отличающиеся от известных способов аудита возможностью автоматизированного выявления пожароопасных состояний без привлечения надзорных органов и впервые позволяющие прогнозировать пожарные риски на основе обработки статистических и экспертных данных о техническом состоянии оцениваемых объектов.

4. Комплекс методик управления пожарными рисками для стационарных и передвижных объектов ЖДТ на стадии их эксплуатации, отличающихся тем, что они позволяют количественно оценивать величину риска появления пожара на основании математического моделирования изменения состояния объекта.

5. Мобильный программно-аппаратный комплекс, впервые позволяющий диагностировать и прогнозировать пожарные риски на объектах ЖДТ в зависимости от их технического состояния и функционального назначения.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность научных положений и результатов диссертационной работы подтверждается экспериментальными исследованиями и практической апробацией разработанных методов и МПК. После внедрения результатов исследования наблюдается снижение количества пожаров. Статистическая значимость различий между

количеством пожаров до внедрения результатов диссертационного исследования и после подтверждена с помощью критерия Фридмана.

Положения и результаты диссертационной работы докладывались на V-й международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2016» (г. Москва 12-13 апреля 2016 года), на научно–техническом семинаре АН РФ «Надежность и качество информационных систем» (г. Москва, МИИТ 25 октября 2017 года), на научно-практическом семинаре «Совершенствование и применение методик определения пожарного риска» (г. Балашиха 21 апреля 2016 года); на VI-й международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2017» (г. Москва 11-12 апреля 2017 г.).

Результаты диссертации внедрены:

1. При разработке Методики расчета пожарного риска на постах электрической централизации, диспетчерской централизации, горочной автоматической централизации (утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 4 августа 2017 г. №1558р).

2. При разработке Методики оценки пожарных рисков в информационно-вычислительных центрах ОАО «РЖД» и классификатора нарушения требований пожарной безопасности (утв. Распоряжением ОАО «РЖД» 20 декабря 2017 г. №2665р).

3. При разработке СТО РЖД 15.016-2017 «Тяговый подвижной состав. Правила оценки и управления пожарными рисками» (утв. Распоряжение ОАО «РЖД» от 29 декабря 2017 г. №2084р).

4. При разработке Методики проведения анализа противопожарного состояния тяговых подстанций в Трансэнерго – филиале ОАО «РЖД» (утв. Распоряжением Директора Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД» 12 января 2018 г. № ТЭ-2/р).

Акты внедрения приведены в приложении диссертационной работы.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 132 источников, 6 приложений, 259 страниц основного текста, 62 таблиц, 64 рисунков.

Автор выражает благодарность и признательность доктору технических наук, профессору Сидоренко В.Г. за внимание и помощь при работе над диссертацией, своему научному руководителю доктору технических наук, профессору Шубинскому И.Б. за методическую, теоретическую и идеологическую помощь в работе на диссертацией.

## **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ИНСТРУМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНЫМИ РИСКАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

В 2014 году пожар был отнесен к событиям, связанным с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта (Положение о классификации, порядке расследования и учета транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, утв. Приказом Минтранса России от 18.12.2014 N 344 (ред. от 01.06.2018)). В 2015 году в ОАО «РЖД» пожар, как вид транспортного происшествия занимает 13-е место (из 30) в перечне, регламентирующим состав комиссии по расследованию случаев нарушения безопасности движения (Положение об организации расследования и учета транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта на инфраструктуре ОАО «РЖД», утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 8 мая 2015 г. N 1185р). Исследования [1, 2, 3, 4] определяют систему обеспечения пожарной безопасности как часть системы обеспечения безопасности движения. К 2019 году с развитием практики оценки рисков в ОАО «РЖД» пожар вошел в реестр рисков и определялся как один из внутренних/основных видов риска [5]. Отличительной особенностью оценки пожарных рисков в сравнении с рисками, связанными с дефектностью, отказами, технологическими нарушениями является отсутствие этапа внутреннего аудита пожарных рисков. Проверки соответствия безопасным состояниям проводятся силами Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС), Федерального государственного предприятия Ведомственная охрана железнодорожного транспорта (ФГП ВО ЖДТ), сторонними предприятиями для оценки индивидуального пожарного риска. Такой подход решает ответственных за безопасную эксплуатацию объект железнодорожной инфраструктуры или подвижного состава ЖДТ (объектов ЖДТ) самостоятельно планировать проведения аудита, а также использовать его результаты для

управления пожарными рисками. Несмотря на то, что количество пожаров на ЖДТ снизилось с несколько сотен (ежегодно) в период с 2003 г. по 2009 г. [6] до нескольких десятков (в год) в период с 2009 г. по 2019 г. [7] ежегодные последствия от пожаров исчисляются сотнями миллионов рублей. Общий прямой материальный ущерб от пожаров составил 39,6 млн. рублей (в 2017 году 93,6 млн. рублей) [7]. Единовременный ущерб от пожара на объекте ЖДТ достигал 24 млн. рублей (2017 г.) [8]. Эта цифра превышает рекордные последствия, установленные пожаром на платформе Ржевская Московской железной дороги в 2014 г (13 млн. 209 тыс. рублей) [9]. Значительный (почти на 100%) рост материальных последствий от пожаров связан с увеличением стоимости оборудования. Особенно это касается пожаров на тяговом подвижном составе, которые приводят к необходимости дорогостоящего капитального ремонта или замены локомотива. На размер последствий пожаров на объектах железнодорожной инфраструктуры влияют факторы: объем перевозов, амортизация оборудования, расположение источника огня и удаленность от него дорогостоящего оборудования, время пожара (с точки зрения последствия для задержки движения и количества людей на вокзалах). Одной из причин крупных пожаров на объектах инфраструктуры ЖДТ является удаленность объектов от пожарных подразделений МЧС [9]. Таким образом, для стационарных и для передвижных объектов ЖДТ актуальна разработка системы управления пожарными рисками, цель которой предотвратить появления пожара.

Вопросы обеспечения пожарной безопасности рассматриваются специалистами, как часть проблемы обеспечения безопасности сложных технических систем [10, 11, 12, 13]. В работе [13] выделено два направления деятельности: профилактическая и оперативно-тактическая. Диссертационное исследование посвящено решению задачи интеллектуализации процессов управления пожарными рисками и повышения безопасности движения. Задачи управления рисками пожаров на стадии проектирования решались с помощью теории игр, основные результаты таких исследований приведены в работах [14, 15].

Процессы появления источников зажигания, из-за большого количества вариантов реализации, плохо поддаются классификации, в отличие от веществ и материалов, для которых на государственном уровне установлены нормы. Однако предотвращения появления именно таких процессов является наиболее эффективным с точки зрения обеспечения пожарной безопасности. В качестве показателя пожарной опасности фактического состояния объекта железнодорожного транспорта была выбрана вероятность возникновения пожара, а не индивидуальный пожарный риск.

Вероятность возникновения пожара, как один из показателей эффективности систем пожарной безопасности, сформулирован ещё в 1991 г. в ГОСТ 12.1.004-91 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования». В соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 объекты защиты должны иметь системы пожарной безопасности, обеспечивающие минимально возможную вероятность возникновения пожара. Это требование определило направление большей части будущих исследований в области разработки методов оценки вероятности возникновения пожара и, как следствие, пожарных рисков. Результаты оценки пожарных рисков должны были обеспечить формирование перечня мероприятий для минимизации воздействия на людей опасных и вредных факторов пожара на объектах, где распространение огня может привести к взрывам, массовому поражению людей на этих объектах и окружающих территориях. Больше всего в таких исследованиях были заинтересованы специалисты нефтегазовой отрасли, владельцы опасных объектов.

В 2008 г. Федеральный закон 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» установил норму индивидуального пожарного риска на объектах защиты, окончательно закрепив этот показатель как главную характеристику пожарного риска. Фактически же пожарный риск, в т.ч. согласно определению, данному в 123-ФЗ, представляет собой сочетание возможности реализации пожарной опасности (пожара) и ее последствий как для людей, так и

для материальных ценностей. Оценка пожарного риска, исходя именно из этих критериев, представляет в последнее время все больший интерес.

Технологический прогресс сопровождается не только повышением эффективности производственных процессов, но и увеличением стоимости оборудования и перерывов в технологических процессах. Таким образом, крупные компании, такие как ОАО «РЖД», не могут руководствоваться индивидуальным пожарным риском как единственным и основным критерием пожарной безопасности своих объектов. Они должны обеспечивать непрерывность производственных процессов и целостность оборудования. Возгорание, даже не приводящее к причинению вреда людям, может нанести существенный ущерб компании.

При этом актуальным становится вопрос разработки методик оценки пожарных рисков с учётом специфики производственных процессов и характеристик отрасли. В 2014 г. Правительственной комиссией по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности (Протокол от 29 августа 2014 г. № 12) была отмечена необходимость разработки методик оценки пожарных рисков для железнодорожного транспорта.

Первым этапом диссертационного исследования является анализ состояния систем автоматизированного управления пожарной безопасностью и оценки пожарных рисков на железнодорожном транспорте. Эта глава предназначена для обоснования актуальности исследования, выявления и формулировки наиболее важных задач управления пожарными рисками объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, установки требований к методологии последующего исследования.

В настоящей главе проведен анализ существующих подходов к оценке пожарных рисков, дана характеристика объекта исследования и проанализированы методы оценки пожарной опасности, автоматизированные системы обеспечения пожарной безопасности. Установлены различия

отечественных подходов к оценке пожарных рисков и методов, применяемых в Европе и Америке.

## 1.1 Состояние системы управления пожарными рисками на железнодорожном транспорте

Управление пожарными рисками в ОАО «РЖД» регулируется через серию стандартов предприятия. Эти стандарты основаны на нормативных актах Российской Федерации и процедурах управления пожарной безопасностью на объектах железнодорожного транспорта с учётом их специфики. В настоящее время действует 4 стандарта организации. Разработка нормативной документации продолжается по мере накопления положительного научно-технического опыта. Необходимость создания собственной серии стандартов вызвана наличием большого числа объектов, на которых реализуются специфичные для железнодорожного транспорта производственные процессы. Управление состоянием объектов железнодорожного транспорта осложняется их территориальным распределением по всей стране. По статистике ежегодное количество пожаров<sup>1</sup> в ОАО «РЖД» составляет несколько десятков, Рисунок 1.1. На Рисунке 1.2 приведена статистка пожаров на тяговом подвижном составе ОАО «РЖД».



Рисунок 1.1 – Динамика количества пожаров в ОАО «РЖД»

<sup>1</sup> Без учёта количества возгораний

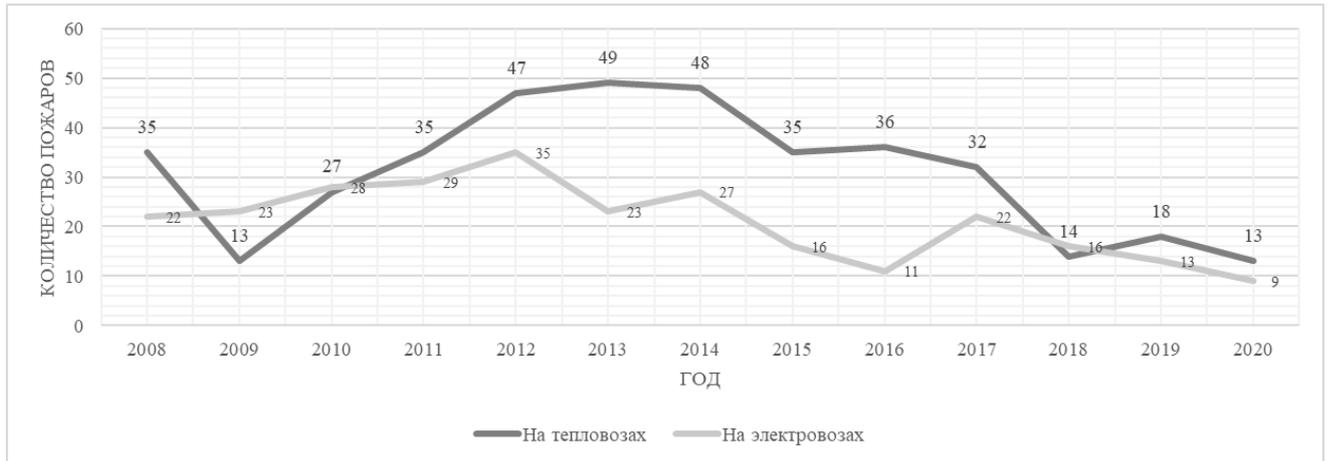


Рисунок 1.2 – Динамика пожаров на тяговом подвижном составе ОАО «РЖД»

Система управления пожарной безопасностью ОАО «РЖД» в соответствии со стандартом СТО РЖД 1.15.009-2013<sup>2</sup> включает в себя три уровня управления: аппарат управления ОАО «РЖД», региональный и корпоративный уровень (включая региональные дирекции) и функциональные филиалы ОАО «РЖД», структурные линейные подразделения ОАО «РЖД». Задачами третьего уровня управления являются: обеспечение пожарной безопасности путем выполнения обязательных требований и добровольной сертификации, регистрация и учёт случаев пожара, формирование перечня мероприятий по обеспечению пожарной безопасности. На втором уровне управления происходит формирование программ по обеспечению пожарной безопасности.

Реализация программ, разработанных региональными дирекциями, связана со значительными денежными вложениями и для определения приоритетности их финансирования на первом уровне управления разрабатываются критерии ранжирования объектов по потребности в инвестициях в пожарную безопасность. В частности, в системе управления пожарной безопасностью (далее, как приведено в СТО РЖД 1.15.009-2013 – СУПожБ) определены перспективные направления

<sup>2</sup> СТО РЖД 1.15.009-2013 "Система управления пожарной безопасностью в ОАО "РЖД". Основные положения"

деятельности ОАО «РЖД» в области пожарной безопасности, которые включают инвестиционную политику и анализ пожарной безопасности.

В стандарте организации 2013 г. установлено, что функционирование СУПожБ обеспечивается за счёт:

- формирования структуры управления пожарной безопасностью;
- сбора, передачи, обмена информацией и ее анализа;
- расследования причин и учёта пожара;
- оценки пожарных рисков;
- нормативного обеспечения;
- планирования и финансирования мероприятий по обеспечению пожарной безопасности.

Оценка пожарного риска является важным инструментом СУПожБ. Основные задачи этой оценки следующие:

- получение объективной информации о состоянии объектов защиты;
- выявление наиболее потенциально опасных объектов защиты и обоснование опасности;
- выработка рекомендаций по уменьшению риска возникновения пожаров и загораний и минимизации ущерба от них.

В рамках СУПожБ задачи оценки пожарных рисков выделены отдельно, т.к. к 2013 г. (год разработки первой редакции СТО РЖД 1.15.009-2013) система анализа пожарной безопасности существовала уже более 10 лет, а деятельность по оценке пожарных рисков менее 3 лет. При этом в области оценки пожарных рисков с 2009 по 2013 г. делались первые отдельные шаги только для стационарных объектов. При этом традиционному анализу пожарной безопасности одновременно подвергались все объекты, включая тяговый подвижной состав, моторвагонный подвижной состав и др. Структура анализа для большинства объектов следующая:

- общая обстановка и последствия пожаров;

— описание состояния пожарной безопасности на стационарных объектах и железнодорожном подвижном составе подведомственных департаментов, Управлений и других структурных подразделений ОАО «РЖД», включающее статистическую информацию о количестве и последствиях пожаров.

Первоначально для исследования пожарной безопасности не применялись специальные методы оценки, а лишь формировались сводные данные о статистике событий (распределение материального ущерба на локомотивах и т.п., на Рисунке 1.3 приведены данные о распределении вины за пожары на ТПС.). Позже стали применяться наиболее простые статистические методы анализа: строились динамические ряды последствий пожаров, отслеживалась тенденция роста. На Рисунке 1.4 приведено распределение долей пожаров по типам объектов. С 2010 г. стал проводиться анализ причинно-следственных связей между случаями пожара и техническими неисправностями с помощью диаграммы Исикавы. 80% пожаров образуют 8 видов объектов ЖДТ: тяговый подвижной состав, специальные машины и специальный подвижной состав (СПС), моторовагонный подвижной состав (МВПС), посты электрической централизации (ЭЦ), административные здания, пункты обогрева, грузовой подвижной состав и котельные.



Рисунок 1.3 – Распределение вины за пожары на тяговом подвижном составе

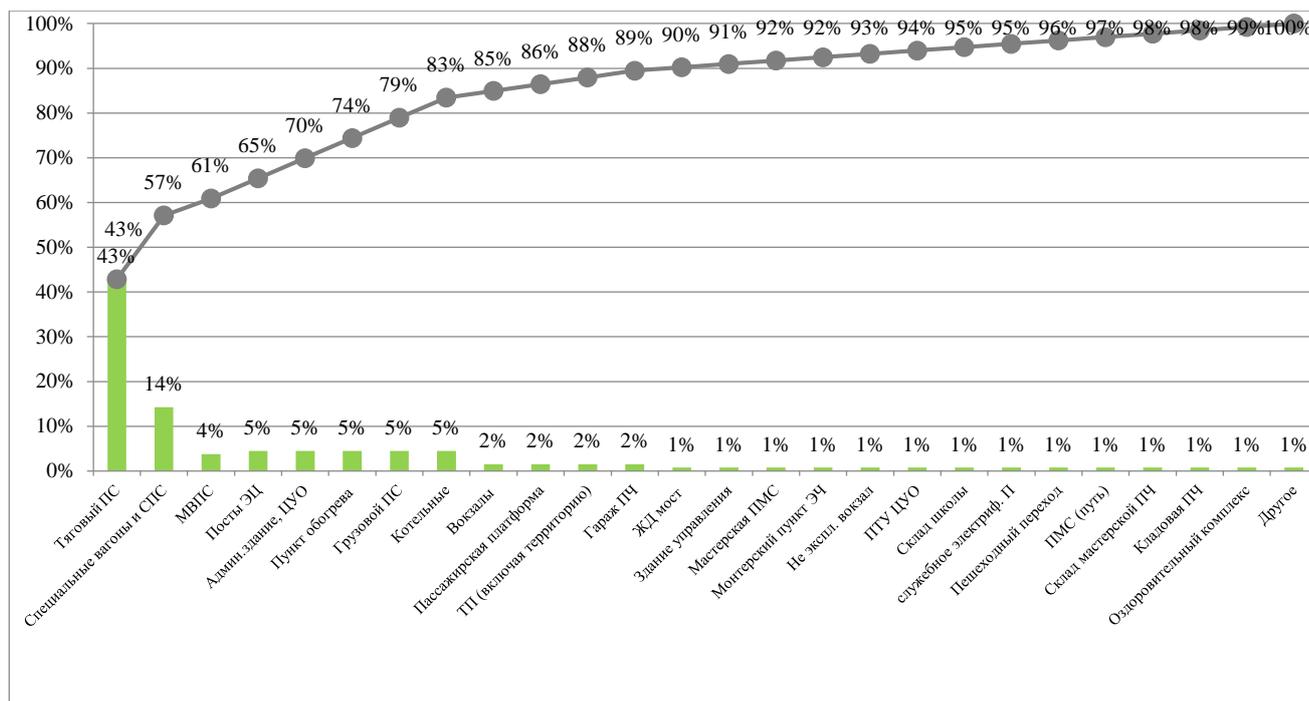


Рисунок 1.4 – Распределение долей пожаров на различных объектах ЖДТ

Однако список объектов, наиболее приоритетных с точки зрения защиты от пожаров должен быть пересмотрен с учетом тяжести потенциальных последствий как для людей (работников и пассажиров), так и для бизнеса ОАО «РЖД» в целом. В этот список должны войти объекты с массовым пребыванием людей: вокзалы, а также объекты, остановки производственных процессов на которых может привести к остановке движения. К таким объектам относятся тяговые подстанции и информационно-вычислительные центры ОАО «РЖД».

К 2014 г. пожарный риск так и не стал частью анализа состояния пожарной безопасности. Собственных методик расчета пожарных рисков у ОАО «РЖД» ещё не было<sup>3</sup>, а применение методик, утвержденных МЧС<sup>4</sup>, не позволяло получить новую информацию об объектах. В соответствии с решениями Правительственной

<sup>3</sup> Утвержденных распоряжением ОАО «РЖД».

<sup>4</sup> Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности (утв. Приказом Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий от 30 июня 2009 г. № 382 г. Москва и Приказ МЧС РФ от 10 июля 2009 г. N 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах»

комиссии по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности<sup>5</sup> в ОАО «РЖД» была начата работа по оценке пожарных рисков на стационарных и передвижных объектах с учётом особенности функционирования железнодорожного транспорта.

Таким образом, разработка системы управления пожарными рисками для ОАО «РЖД» является актуальной задачей. Отличительной особенностью методической базы этой системы должна быть возможность обоснования принятия решений при формировании программы по обеспечению пожарной безопасности с учётом состояний множества объектов.

---

<sup>5</sup> Протокол от 29 августа 2014 г. № 12.

## 1.2 Нормативное обеспечение методологии оценки пожарных рисков в Российской Федерации

В истории нормативного обеспечения оценки пожарных рисков в Российской Федерации можно выделить два крупных этапа: до вступления в 2008 г. в действие Федерального закона 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» и после.

Основные нормативные документы с 1991 г. по 2008 г.:

— ГОСТ 12.1.004-91 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования»

— ГОСТ Р 12.3.047-98 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля»

— «Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий (утв. МЧС России 17 марта 2006 г.)».

— Основные нормативные документы с 2008 г. по 2018 г.:

— Федеральный закон № 123 ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»;

— ГОСТ Р 51901.10-2009/ISO/TS 16732:2005 «Менеджмент риска. Процедуры управления пожарным риском на предприятии»;

— «Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности» (утв. Приказом МЧС № 382 в 2009 г.);

— «Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» (утв. Приказом МЧС № 404 в 2009 г.);

— «СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности».

В основу разработки методик и нормативов после 2008 г. были положены действовавшие ранее стандарты и исследования специализированных институтов. Поэтому подробнее рассмотрим содержание этих документов.

### 1.2.1 Оценка пожарных рисков в Российской Федерации в период с 1991 г. по 2008 г.

Исследования этого периода времени можно разделить на две большие группы: первая группа – это модели, которые описывают такие характеристики как горение, турбулентные потоки, передача тепла, излучение. Вторая - движение людских потоков при эвакуации. В рамках этого раздела будет установлено, как используются результаты моделирования, а также возможность применения унифицированных моделей для объектов различных типов: опасных производственных объектов, складов, объектов, где реализуются технологические процессы передвижных объектов.

Исторически первыми появились модели, описывающие процессы горения. При этом неразрывно с пожарной безопасностью исследовалась и нормировалась взрывобезопасность. Уже в 1979 г. стандартом ГОСТ 12.0.010-76<sup>6</sup> была установлена допустимая вероятность взрыва: «...вероятность воздействия опасных факторов взрыва на людей в течение г. не превышала  $10^{-6}$  на человека». Возможно, именно этот показатель трансформировался в норму индивидуального пожарного риска в 123-ФЗ.

Требования ГОСТ 12.0.010-76 распространяются на производственные процессы. Основными факторами, характеризующими опасность взрыва, являлись<sup>7</sup>: максимальное давление и температура взрыва, скорость нарастания давления при взрыве, давление во фронте ударной волны, дробящие и фугасные свойства взрывоопасной среды. Аналогичным образом были описаны факторы, воздействующие на людей при пожарах: ударная волна, пламя, обрушивающиеся конструкции, вредные вещества, выделяющиеся при взрыве.

Отдельно исследовались вопросы обеспечения пожарной и взрывобезопасности производств, применяющих газы и жидкости [16], предприятий электроники [17], деревообрабатывающей промышленности [18] на морском транспорте [19, 20].

---

<sup>6</sup> ГОСТ 12.1.010-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Взрывобезопасность. Общие требования

<sup>7</sup> П. 1.6 ГОСТ 12.1.010-76

Систематизация методов моделирования возникновения и развития пожара проведена в Санкт-Петербургском университете государственной службы МЧС России [21]. В данной работе выделены 3 группы математических моделей: интегральная, зонная, полевая. Общим в этих моделях является то, что все они позволяют рассчитать параметры среды в процессе горения газовой среды или на различных стадиях пожара внутри помещения.

В 80-х гг. XX века опыт моделирования и исследований процессов горения на производственных объектах был обобщен в справочнике [22] и ГОСТах (ГОСТ 12.1.041-83 «ССБТ Пожаровзрывобезопасность горючих пылей. Общие требования», ГОСТ 12.1.044-89 ССБТ. «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения»). Справочник [22] позже переиздавался несколько раз. С появлением новых строительных материалов появлялись новые справочники. В 1991 г. появился ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. «Оборудование производственное. Общие требования безопасности», устанавливающий необходимость анализа опасных ситуаций, имевших место при эксплуатации производственного оборудования». Примечательно, что в п. 1.3 ГОСТ 12.2.003-91 указано, что требования безопасности к производственному оборудованию конкретных групп устанавливаются с учётом научно-исследовательских работ, а также анализа средств и методов обеспечения безопасности. Природой такой формулировки является большое физическое разнообразие производственного оборудования, технологических средств. Немалую неопределенность в вопросы обеспечения пожарной безопасности вносит непрерывное развитие промышленности и появление новых материалов как горючих, так и негорючих. Этот факт привёл к появлению стандартов, устанавливающих требования к испытаниям. В Таблице 1.1 приведена информация об использовании результатов моделирования процессов горения для целей обеспечения пожарной опасности с учётом вида объекта защиты.

Таблица 1.1 – Использование результатов моделирования процессов горения до 2008 г.

Вид объекта защиты	Факторы модели	Использование результатов моделирования
Производства, применяющие газы и жидкости	Показатели пожарной опасности легковоспламеняющихся веществ и материалов, оценка пожарной опасности производств, связанных с получением, применением и хранением горючих газов; в условиях аварийного истечения горючих газов под давлением; производств, связанных с возможным аварийным разливом горючих жидкостей [23]	Способы прекращения горения, разработка требований к пожарной безопасности на участках заготовительных производств
Предприятия электроники	Горючие материалы, используемые на предприятиях радиоэлектроники, водороды и газы, применяемые в производстве	Меры борьбы с пожарами и предотвращение распространения пожара
Деревообрабатывающая промышленность	Возгораемость древесины, технологические процессы и зависимость их пожарной опасности от сырья, готовой продукции и оборудования	Противопожарный режим, правила эвакуации, разработка мер борьбы с пожарами
Морской транспорт	Пожароопасные грузы, электрические части судов, баллоны с газами, ремонт танкеров	Меры борьбы с пожарами и предотвращения распространения пожара

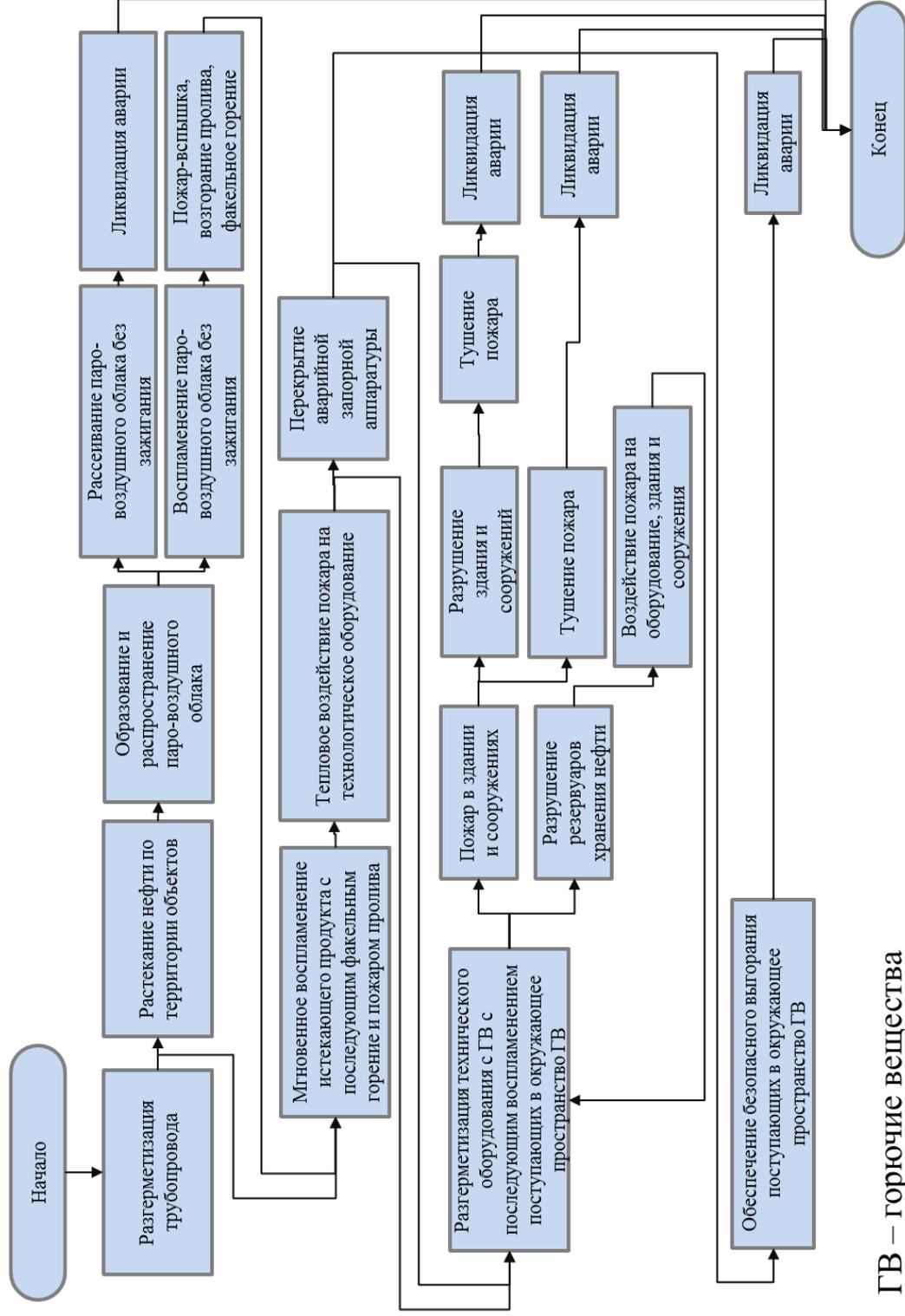
Полученные знания о процессах развития пожара, особенностях горения использовались для разработки оборудования пожаротушения и огнетушащих веществ. В конце 80 гг. XX века были стандартизированы классы пожаров для обозначения устройств и средств, предназначенных для тушения пожаров данного класса. Развивались и методы тушения пожаров, в 90-х гг. XX века появилась целая серия стандартов, регламентирующих испытания, назначение и порядок эксплуатации установок пожаротушения. В это же время на основе вышеприведенных исследований, а также работ Н.Н. Брушиловского [24] резко возрос интерес исследователей к проблемам анализа и формализации описания процессов возникновения пожарной опасности. Уже в 1992 г. в обзорной работе «Оценка рисков пожаров и катастроф» было рассмотрено более 400 публикаций [25].

Накопившиеся знания о процессах горения позволили разрабатывать и даже стандартизировать методы оценки пожарного риска. В 1998 г. появился ГОСТ Р 12.3.047-98, регламентирующий метод расчёта индивидуального и социального риска для производственных зданий из-за воздействия опасных факторов пожара (ОФП). Основными оцениваемыми параметрами являются: расчётное время эвакуации и время от начала пожара до блокирования путей эвакуации. Время блокирования вычисляют путем расчёта допустимой концентрации дыма и других ОФП. Значительно меньше внимание в ГОСТ Р 12.3.047-98 уделено такому фактору как вероятность возникновения пожара. Позже это привело к тому, что в качестве вероятности возникновения пожара стала выступать частота пожаров в зданиях одного функционального назначения. Такая модель учитывала конструктивные особенности объектов защиты (горючесть материалов, расположение и размеры эвакуационных выходов и т.п.), но не специфику условий эксплуатации.

Однако это была не единственная модель оценки пожарных рисков. Прежде чем перейти к анализу этих моделей, рассмотрим, чему посвящены научные исследования в этой области. В монографии 2007 г. [24] рассмотрены вопросы различия понятий «опасность», «безопасность», «риск» у авторов различных исследований и нормативных документов 1990-2000 гг. Одним из результатов этого анализа был вывод о том, что если у всех специалистов существует единая точка зрения по поводу понятия «безопасность», то определений и трактовок для терминов «риск» и «опасность» множество. При этом наибольшее число вопросов в этот период вызывало понятие «риск». Для обобщения понятия «риск» коллектив ФГУ ВНИИПО МЧС России определил перечень ключевых словосочетаний, используемых исследователями конца XX века для характеристики понятия «риск»: возможная опасность неудачи; вероятность или частота поражающих воздействий; ожидаемый ущерб, вероятность причинения вреда; количественная мера опасности; возможность нежелательных последствий; потенциальная опасность реализации событий с нанесением вреда; мера возможности опасности и последствий ее реализации.

В конечном итоге было сформулировано обобщающее понятие риска, как количественной характеристики возможности реализации опасности конкретного вида. При этом было отмечено, что опасность могут характеризовать *различные* риски, оценивающие её *различные* стороны: частоту возникновения, с одной стороны, и размер последствий реализации опасности, с другой стороны. Этот вывод и образ мышления во многом определил типы дальнейших исследований и интересов институтов МЧС РФ. Одним из следствий этого стало то, что под опасностью, в общем случае, стали подразумевать присущие объекту химические и физические свойства, обуславливающие потенциальные возможности нанесения ущерба здоровью людей, имуществу, окружающей среде (ОС). Причины, приводящие к реализации опасности, рассматривались в обобщенной формулировке, например «отказ». Это привело к тому, что при использовании классических методов оценки рисков, например, логических деревьев, процесс инициации (возникновения) пожара описывался одной вершиной, например «разгерметизация трубопровода». Вся остальная часть дерева описывала развертывание аварийной ситуации с учётом применения мер защиты: тушение пожара, перекрытие аварийной запорной аппаратуры и др. (Рисунок 1.5).

В Таблице 1.2 приведена систематизированная информация о методах, применяемых для оценки пожарных рисков в период с 1991 г. по 2008 г. Главным предметом моделирования было исследование процессов уже начавшегося горения, распространения опасных факторов пожара (ОФП). При этом многие исследования носили отраслевой характер: анализ пожаров в нефтяной, добывающей, лесной промышленности и т.д.



ГВ – горючие вещества

Рисунок 1.5 – Логическое дерево событий при возникновении и развитии пожара и-за разгерметизации

Таблица 1.2 – Анализ методов оценки пожарных рисков в период 1991 г. по 2008 г.

Метод	Учитываемые факторы	Оцениваемые параметры	Цель	Использование
Логическое дерево событий [24]	Вероятность срабатывания средств предотвращения и локализации аварии; Вероятность поражения технического оборудования; Факельное горение; Выброс горючих газов; Сгорание газоздушного облака и т.п.; Иницирующее событие	Условные вероятности реализации различных ветвей логического «дерева событий»; Число сценариев	«Осмысление вперед». Рассмотрение цепочки событий, приводящих к распространению пожара и возникновению аварии	Для построения полей поражающих факторов пожара; Оценка потенциального риска
Построение полей поражающих факторов [25, 26, 27]	Истечение жидкости и/или газа из отверстия при разгерметизации оборудования; Растекание жидкости при разрушении оборудования; Испарение жидкости из пролива; Формирование зон загазованности; Сгорание газоздушной смеси и т.п.	Величины ОФП <sup>8</sup> : интенсивность теплового излучения, температура ОС <sup>9</sup> , концентрация углекислого газа, кислорода, параметры ударной волны, зона поражения при пожаре-вспышке	Оценка опасных факторов на основе математического моделирования физических явлений	Для оценки последствий аварий с пожарами и взрывами
Оценка последствий аварий с пожарами и взрывами [24, 28, 29]	Величины ОФП, критерии поражения ОФП людей, зданий, сооружений и оборудования	Критерий поражения окружающих объектов	Оценка последствий	Оценка потенциального риска

<sup>8</sup> ОФП – опасные факторы пожара.<sup>9</sup> ОС – окружающая среда.

Оценка потенциального риска [24, 30]	Число сценариев, Критерии поражения окружающих объектов; Частота реализации сценариев	Произведение вероятности поражения человека на частоту реализации сценария пожара	Формирование «контуров риска»	Для выбора эффективных мероприятий по обеспечению пожарной безопасности
--------------------------------------	---	---	-------------------------------	---

В работе [31] отмечено, что большинство специалистов, работавших в этот период, главным образом анализировали риски опасных промышленных объектов, что не позволило сформировать целостную концепцию теории пожарных рисков из-за отсутствия анализа сложных социально-экономических систем. В исследовании [31] введены понятия локальных и интегральных рисков, что обеспечивает возможность учёта интереса производственных предприятий при оценке пожарных рисков.

Итогом исследований, проводившихся в период с 1991 по 2008 гг., стало формирование и развитие концепции объектно-ориентированного («гибкого») нормирования промышленных предприятий по пожарной безопасности. Эта концепция была реализована в докторской диссертации Молчанова В.П. [31], в которой рассмотрено более 10 научных трудов в сфере оценки пожарных рисков в нефтегазовой области, в т.ч. методы расчета социальных риска [32]. Его работы в этой сфере были использованы для разработки руководства по оценке пожарных рисков для промышленных предприятий [33].

Другими векторами, к которым прилагались основные усилия исследований (помимо исследований рисков и взрывов нефтепродуктов и газов), были разработка методов анализа пожарных рисков жилых зданий и лесных массивов.

### **1.2.2 Оценка пожарных рисков в Российской Федерации с 2008 г.**

Накопленный опыт в области моделирования процессов развития пожаров и движения людских потоков привел к тому, что приказами МЧС были утверждены методики оценки пожарных рисков на производственных объектах и объектах различного функционального назначения.

Основным показателем пожарного риска в этих методиках является индивидуальный пожарный риск, т.е. риск причинения вреда жизни и здоровью человека при пожаре. Этот показатель позволяет сотрудникам МЧС оценивать вероятность успешной эвакуации людей в случае пожаров и управлять факторами, влияющими на эту вероятность. Именно на эти факторы сделан основной акцент утвержденных МЧС методик.

Другой важный фактор - вероятность пожара оценивается как частота пожаров на объектах определенного типа на основе общего количества пожаров. Такой подход не позволяет ранжировать факторы, влияющие на возникновения пожара, и эффективно планировать корректирующие мероприятия.

Новые исследования, подчиняясь приоритетным задачам МЧС, касались таких вопросов, как оценки влияния средств аварийной эвакуации на величину пожарного риска [34], средств систем противопожарной защиты [35, 36]. На железнодорожном транспорте этот вопрос также был и является актуальным для объектов с массовым пребыванием людей. В исследовании [9] отмечено, что основными мероприятиями по защите подвижного состава является обеспечение безопасности людей и окружающей среды. В работе [9] отмечено, что при составлении руководства по анализу риска необходимо хорошее знание подвижного состава, для которого будут разрабатываться показатели, позволяющие вскрыть потенциал пожарной опасности.

В работе [37] отмечено, что в методиках расчета индивидуального, социального, коллективного и потенциального пожарного риска используются вероятностные оценки, статистической базой которых являлись иностранные источники. В работе [37] указано на необходимость более широкого применения механизмов теории вероятности, теории надежности при проектировании объектов и оценке рисков на них.

Активно развивается теоретическая база моделей оценки пожарных рисков. Для учёта влияния поведения владельцев или эксплантатов объектов защиты стала использоваться теория активных систем [38, 39]. В работе [40] и др. определено, что для производственных объектов, на которых невозможно достижение уровня

пожарного риска в размере одной миллионной в год, необходимы учёт и оценка влияния индивидуальных факторов объекта на пожарную безопасность и учёт неопределенности связей между этими факторами. В качестве математического аппарата, который позволяет это сделать, может быть использована теория нечётких множеств. Для объектов со схожими физико-химическими характеристиками стали использовать модели стохастического или вероятностного метода описания процессов на основе теории конечных цепей Маркова [41]. Эти модели позволяют не только прогнозировать появление пожаров, но также могут быть использованы для расследования пожаров, т.к. они позволяют вычислить наиболее вероятный сценарий пожара на основании его последствий. Однако применение моделей такого рода сопряжено с двумя факторами: необходимостью формирования графа состояний и сложностью вычислений. Для того, чтобы минимизировать расчёты, обычно используются графы с минимальным количеством состояний, что существенно сокращает эффективность моделирования. Для эффективности планировочных решений и выборе стратегий тушений пожара использовалась теория игр [14, 15].

В Таблице 1.3 приведена сводка новых результатов в области оценки пожарных рисков, полученных при использовании теоретической базы, отличной от базы, применяемой до 2008 г.

Таблица 1.3 – Анализ новых методов оценки пожарных рисков, применяемых с 2008 г. в дополнение к методам расчёта потенциального пожарного риска

Теоретическая основа	Факторы	Вид зависимости/инструмент	Новый результат
Теория активных систем	Профилактируемые факторы (нарушение требований пожарной безопасности, неосторожное обращение с огнем и т.п.). Далее – ПФ. Вероятность выполнения требования	Линейная зависимость между количеством пожаров и количеством ПФ.	Вероятность возникновения пожара за счет ПФ.

	пожарной безопасности.		
Теория нечётких множеств	Общие, системно-технологические, эксплуатационные.	Лингвистическая терма для каждого фактора, метод центра тяжести.	Более точный и чувствительный к индивидуальным характеристикам метод оценки
Теория конечных цепей Маркова	Устойчивые состояния: горение отсутствует, успешное горение; промежуточное состояние: режим тления.	Граф состояний.	Среднее время нахождения в каждом состоянии, вероятность прекращения пожара.
Теория игр	Время эвакуации рассчитывают по методике; времена наступления опасных факторов пожара; конструктивно-планировочные решения	Платежная матрица	Демонстрация сценариев, при которых соответствие нормативных требований не обеспечивает необходимый уровень безопасности [14]

Большое количество исследований и дополнительных действий, предпринимаемых для оценки собственных пожарных рисков владельцами объектов защиты, не осталось без внимания МЧС. В новой редакции Федерального Закона № 294-ФЗ «О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля» появляется понятие риск-ориентированного подхода к осуществлению государственного надзора в области пожарной безопасности. Этот подход заключается в дифференциации уровня проверок в зависимости от категории опасности предприятий. При этом в исследовании [42] отмечено, что один из двух изначально запланированных подходов по реализации риск-ориентированного надзора не был осуществлен. Он должен был основываться на оценке вероятности несоблюдения обязательных требований пожарной безопасности, но методики для оценки этой вероятности не были утверждены. Как упоминалось выше, эта тема была одним из объектов исследований в работах [38,

39], проводимых в 2013 – 2016 гг. Но, очевидно, к году выхода [42] в 2016 г. этот опыт не мог быть обобщен для использования на национальном уровне. Это обстоятельство отчасти объясняется тем, что в попытках развить и дополнить методики оценки пожарных рисков исследователи опирались на значительно большее количество различных теорий и математических аппаратов, чем в период до 2008 г. (где в основе всех методов лежал метод построения полей поражающих факторов). Не менее важным фактором является увеличение скорости технического прогресса, увеличение количества различий между условиями появления пожара в различных отраслях. Это обстоятельство образует барьер для обобщения успешного опыта, достигнутого в одной из отраслей (например, от нефтяной отрасли на остальные), с чем исследователи раньше не сталкивались. Таким образом, можно с большой достоверностью сказать, что развитие методов оценки пожарных рисков является в настоящее время актуальной задачей как на национальном уровне, так и на уровне отраслей и отдельных владельцев защиты, отвечающих за безопасность сложных систем. Сейчас наибольший интерес представляет разработка системы, позволяющей интегрировать накопленные до 2008 г. опыт и результаты, полученные в новых исследованиях.

### 1.3 Оценка пожарных рисков в странах Европы и Америке

В 2009 г. в работе [43] сделан обзор подходов и методов оценки пожарных рисков, включивший в себя анализ 46 источников. В 2010 г. на 209 листах проведен анализ содержания британских стандартов и руководств серии BS 7974 [44]. Большинство из них основываются на определении безразмерных показателей пожарной опасности, индексов пожарного риска. Наиболее известные из них: индекс Гретенера, индекс FRAME, индекс пожара и взрыва Дау Кемикал, индекс FSES [43]. Несомненным преимуществом этих моделей является то, что в отличие от отечественных, они учитывают показатели объекта, влияющие на вероятность возникновения пожара или взрыва. Принцип, заложенный в этих методах, основан на оценке отличий условий реализации производственной деятельности от заданных базовых характеристик. Например: назначение помещения, количество комнат, использование легковоспламеняющихся материалов, количество средств тушения пожара и т.п. Эти методы отличаются от методик МЧС тем, что учитывают множество характеристик объекта защиты, а не опасность распространения пожара из наиболее удалённого от выхода помещения в здании.

Практическое применение индексов пожарного риска для расчета риска пожара на Российских железных дорогах затруднено из-за того, что при анализе источников потенциальной опасности не учитывается их фактическое состояние, также отсутствуют методы прогнозирования показателей пожарного риска на основе фактического состояния объектов, учитывающие специфику ЖДТ.

Обобщение результатов анализа отечественного и международного опыта сводится к следующему:

- расчет индивидуального пожарного риска производится для целей проектирования новых объектов;
- чрезвычайно важно избавиться от упрощенных подходов, не способных давать объективные данные для принятия проектных и эксплуатационных решений;

- вероятностные и эвристические подходы взаимно дополняют друг друга;
- учёт индивидуального риска, как единственного критерия пожарного риска, не позволяет решать вопросы страхования и другие вопросы, связанные с материальным ущербом.

Главной отличительной особенностью подходов к оценке пожарных рисков на национальном уровне является то, что британские стандарты регламентируют возможность выбора метода, который будут использовать предприятия для оценки пожарного риска. При выборе метода оценки пожарного риска для конкретного применения необходимо учитывать следующие факторы: цели заинтересованных лиц и критерии допустимости; содержание оценки пожарного риска; целевая аудитория и лица, принимающие решения; нормативные и/или судебные вопросы; прецеденты подобного применения; имеющиеся в наличии ресурсы и данные; ограничения по времени и расходам; квалификация персонала и потенциальная необходимость учета неопределенностей.

## **1.4 Обзор существующего программного обеспечения для диагностики пожароопасных состояний и оценки пожарных рисков**

### **1.4.1 Автоматизированное диагностированное неисправностей объектов, влияющих на пожарную безопасность**

Первые пожарные датчики были разработаны в XIX веке и основывались на определении температуры, то есть по существующей классификации являлись тепловыми пожарными извещателями [45]. Именно с датчиков начинается большинство автоматизированных систем контроля и регулирования (управления). С развитием информационных технологий обеспечение безопасности становится все более простой задачей из-за внедрения систем пожарной автоматики. Однако существенно увеличилось время, необходимое на проектирование таких систем. В сфере обеспечения пожарной безопасности на данный момент можно отметить наличие автоматизированных систем управления пожарной безопасностью, а также применение интеллектуальных и роботизированных систем при оповещении, тушении пожара. При проектировании зданий с системами автоматического тушения пожаров используется компьютерное моделирование процессов эвакуации из зданий. Автоматизация и информатизация видна на каждом из этапов обеспечения пожарной безопасности, как в системах предотвращения пожара, так и в системах противопожарной защиты. В основе этой автоматизации лежат технологии, позволяющие собирать статистическую информацию о случаях пожара, анализировать, расследовать и предлагать решения для предотвращения повторных инцидентов.

Для обеспечения пожарной безопасности крупных объектов различные программно-аппаратные комплексы объединяются в единую автоматизированную систему управления пожарной безопасностью. Исследованию архитектуры программного обеспечения систем, связанных с безопасностью, посвящена работа [46]. Событийная система обладает рядом преимуществ, ценных для задач обеспечения пожарной безопасности: в систему легко может быть добавлен новый

компонент, компоненты могут реагировать на любые события. Однако для архитектуры такого типа нет гарантий реакции на события, следовательно, подтверждение реакции на событие должно производиться явно. В связи с этим необходим интерфейс взаимодействия с внешними системами, человеком или автоматизированными системами поддержки принятия решений. В соответствии с требованиями свода правил [47] для обнаружения места возгорания в качестве идентифицирующего устройства могут использоваться телевизионные камеры и матричные световые датчики с адресным указанием очага пожара, адресные автоматические пожарные извещатели, сигнализаторы потока жидкости или спринклерные оросители с контролем пуска. На эффективность всех последующих после обнаружения возгорания действий влияет скорость обработки извещателем сигналов, поступающих из окружающей среды. Для этих целей разрабатываются различные алгоритмы обработки контролируемых параметров окружающей среды швы [48]. Другим важным фактором является надежность программного обеспечения. Вопросами надежности автоматизированных систем управления, в т.ч. пожарной безопасностью, занимались многие исследователи [49 – 52]. В работе [53] исследована задача защиты программного обеспечения от сбоев аппаратуры, что особенно актуально для систем, основанных на датчиках. Высокая скорость работы датчиков и надежность элементов автоматизированных систем являются необходимыми, но не достаточными условиями для эффективного управления пожарной безопасностью сложных технических объектов. Современные системы должны позволять не только эффективно тушить обнаруженный пожар, но и предотвращать появление горения. Для этого в схему работы пожарной сигнализации (ПС) и системы оповещения и управления эвакуацией людей (СОУЭ), представленных в работе [54], должен быть добавлен контур раннего обнаружения пожароопасных состояний до возникновения горения (Рисунок 1.6).

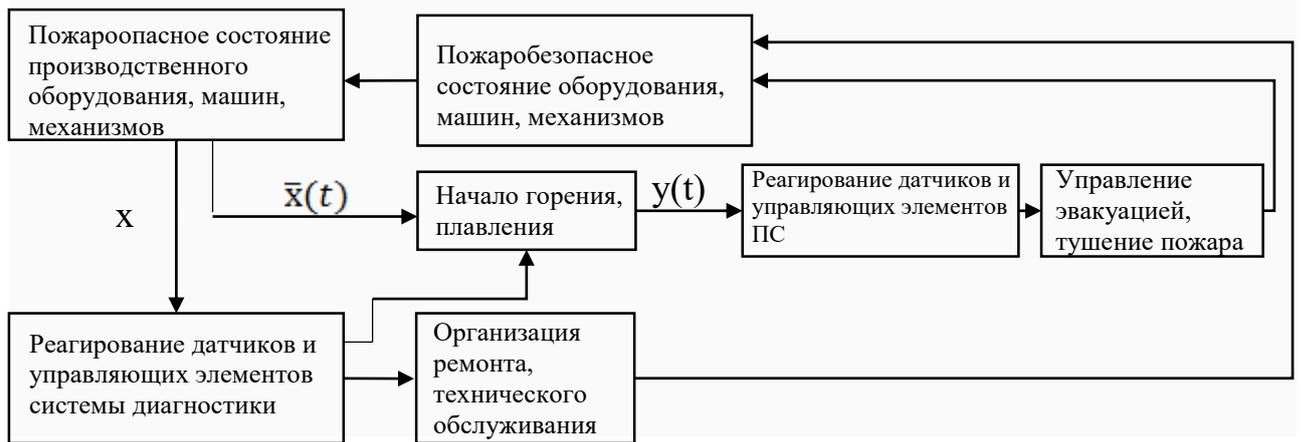


Рисунок 1.6 – Схема работы ПС и СОУЭ с контуром обнаружения пожароопасных состояний до появления горения

На Рисунке 1.6 обозначено:

$x(t)$  – параметры объекта оценки (оборудования / машины / механизма), свидетельствующие о наличии пожароопасного состояния объекта, которые могут быть выявлены с помощью средств диагностики, в т.ч. визуального осмотра объекта человеком;

$\bar{x}(t)$  – параметры объекта оценки (оборудования / машины / механизма), свидетельствующие о наличии пожароопасного состояния объекта, которые не могут быть выявлены с помощью средств диагностики, в т.ч. визуального осмотра объекта человеком;

$y(t)$  – параметры окружающей среды, регистрируемые пожарной сигнализацией.

Большинство автоматизированных систем управления пожарной безопасностью содержат только датчики, реагирующие на параметры  $y(t)$ . В настоящее время, ввиду увеличения стоимости оборудования и круглосуточной работы технических систем, необходима система, способная идентифицировать признаки пожароопасного состояния до возникновения горения. Такая система позволит избежать аварийной остановки производственного процесса, а также существенно сократить затраты, в т.ч. из-за предотвращения потерь бизнеса. Особенно актуален вопрос предотвращения потерь бизнеса из-за аварийной

остановки производственного процесса для ЖДТ. Для построения проактивной системы управления пожарной безопасностью необходима разработка методов и инструментов диагностики параметров, свидетельствующих о наличии пожароопасного состояния объекта. На основании оценки пожарных рисков выявленных состояний должно приниматься решение об изменении состояния контролируемого объекта до возникновения горения. В Таблице 1.4 приведён анализ технических средств, применяемых для прогнозирования пожарной опасности объектов до возникновения горения.

Таблица 1.4 – Основные средства обнаружения признаков пожарной опасности до возникновения горения

Объект	Техническое средство	Контролируемое пожароопасное состояние
Объекты нефтеобрабатывающей промышленности [55]	Датчик контроля загазованности	Взрывоопасная концентрация газа
Спортивные сооружения [56]	Датчики концентрации горючих газов и паров аммиака	Взрывоопасная концентрация газа, предельно-допустимая концентрация
Трубопроводы [57]	Датчик давления	Повышенное давление
Торфяники [58]	Газовые торфяные стволы-термозонды	Температура, концентрация газов

В настоящее время проактивные системы управления пожарной безопасностью применяются преимущественно в нефтегазовой отрасли, и основным параметром  $x(t)$ , который можно наблюдать, является концентрация газа. Автоматизированные системы, основанные на газосигнализаторах, также применяются в замкнутых системах: на подводных лодках, складах. Однако такие инструменты диагностики не применимы на многих других производственных объектах. Возникает необходимость разработки автоматизированных систем мониторинга неисправностей, влияющих на пожарную безопасность. Особенно актуальна эта задача в свете масштабной автоматизации производственных процессов и появления баз данных о фактическом состоянии объектов. Например,

в ОАО «РЖД» функционируют автоматизированные системы учёта отказов технических средств [59], система управления надёжностью и рисками [60]. Информацию из этих систем следует использовать для решения различных задач. Однако не всегда целесообразна полная автоматизация процессов диагностики. Важное значение имеет цена датчиков, сенсоров и т.п., наличие уже существующих систем осмотра объектов с участием человека. Последнее особенно важно для объектов, проходящих регулярные циклы технического обслуживания и ремонта (ТОиР). К таким объектам на ЖДТ относятся: тяговый подвижной состав, оборудование постов электрической централизации, оборудование тяговых подстанций и т.п. На этих объектах уже существует налаженная система ТОиР. Результаты диагностики объектов в рамках ТОиР могут быть использованы и для целей обеспечения пожарной безопасности. Очевидно, что пожароопасных состояний объектов намного меньше, чем неисправных или предотказных состояний. Ввиду этого целесообразно говорить о пожарном аудите объектов, критерии которого должны быть связаны с состояниями, которые действительно могут привести к пожару.

Вышеописанные автоматизированные системы (АС) по их функциональному назначению можно объединить в три группы:

- АС тушения пожара и управления эвакуацией (АСУ ТПиЭ),
- АС обнаружения пожаров и состояний, им предшествующим,
- АС учёта и управления информацией о пожарах.

В основе АСУ ТПиЭ лежат две группы математических моделей: модель развития пожара и модель поведения людей при пожаре. Первая группа моделей описывает такие характеристики как горение, турбулентные потоки, передача тепла, излучение. Вторая - движения людских потоков при эвакуации. Именно АСУ этого типа призваны минимизировать индивидуальный пожарный риск, нормируемый Федеральным законом №123-ФЗ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.

### 1.4.2 Автоматизированная оценка пожарных рисков

Расчёт пожарных рисков, как на основе методов, перечисленных в параграфе 1.3, так и на основе методик, утвержденных приказом МЧС, сопряжен со значительными временными затратами, а также трудоемок в части построения полей опасных факторов пожара и моделировании процессов эвакуации. В связи с этим, сразу после вступления в силу 123-ФЗ стали появляться программы для расчета пожарного риска.

Часть программных решений основана на методиках МЧС, часть – на собственных разработках независимых аудиторских фирм. Также существует ряд зарубежных программ (которые, однако, ввиду отсутствия русификации не популярны в Российской Федерации).

Фогард-ПР – отечественный продукт, разработанный в соответствии с методикой, утверждённой приказом МЧС РФ от 10.07.2009 г. № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах». Фогард-ПР представляет собой web-приложение [61] и предназначена для расчёта величин пожарного риска на производственных объектах путем:

- построение полей опасных факторов пожара для различных сценариев его развития;
- определение потенциального пожарного риска на территории объекта и зданиях;
- определение индивидуального пожарного риска в зданиях и на территории объекта;
- определение индивидуального и социального пожарного риска жилых и общественных зданий, располагаемых вблизи производственного объекта.

Основным ограничением программы Фогард-ПР, с точки зрения пользователя, является необходимость постоянного соединения с сетью Интернет, что накладывает ограничения на использование его на удалённых объектах.

Отечественный программный комплекс «ТОКСИ+Risk» предназначен для количественной оценки риска. Расчет риска проводится по Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах, утвержденной Приказом МЧС от 19 июля 2009 г. № 404. Программный комплекс «ТОКСИ+Risk» включает визуальную оболочку, единую для всех подключенных к комплексу модулей базу данных со свойствами опасных объектов, базу данных параметров проекта, а также программные модули, реализующие сами методики как для проведения отдельных расчетов, так и для комплексного решения задачи оценки риска [62].

Отличительными от Фогард-ПР возможностями «ТОКСИ+Risk» являются:

- возможность осуществлять ввод расположения и характеристик оборудования, а также объектов, подверженных риску (люди, здания и сооружения, дороги), с привязкой к карте;
- учет специфики эксплуатации объектов: метеоданные, экология и т.д.;
- сертификатами соответствия требованиям нормативных документов Российской Федерации;
- независимость от соединения с сетью Интернет, что позволяет использовать его на удалённых объектах.

Другими программами, обладающими функциями, аналогичными Фогард-ПР и ТОКСИ+Risk являются: программы компании СИТИС [63, 64, 65], СИГМА ПБ [66, 67, 68], PROMRISK [69, 70], «FireCat» [71], «Fenix+», «URBAN» [69].

С 2012 г. Академией МЧС России ведется разработка и развития программного комплекса по оценке вероятности поражения человека, здания и оборудования при различных вариантах пожаров на наружных технологических установках [72] (далее – пожарного комплекса). Основным назначением пожарного комплекса является оценка ОФП при различных сценариях развития пожара, и он состоит из 7 комплексов:

- расчетный комплекс для определения ОФП от пожара пролива;
- расчетный комплекс для определения ОФП от огненного шара;
- расчетный комплекс для определения ОФП от пожара-вспышки;

- расчетный комплекс для определения ОФП от факельного горения;
- расчетный комплекс для определения ОФП при сгорании (взрыве) парогазовоздушной смеси;
- расчетный комплекс для определения ОФП взрыве емкости с перегретой жидкостью в очаге пожара;
- расчётный комплекс для определения массы паров жидкости с поверхности разлива.

Расчеты пожарных рисков, основанные на оценке ОФП, используются не только для расчета индивидуального пожарного риска, но и для проектирования эффективных систем пожаротушения [73, 74].

Хотя на сегодняшний день существуют программные решения, реализующие расчет пожарного риска, ни одно из них не предназначено для предотвращения появления пожара. Все вышеупомянутые системы призваны минимизировать последствия развития пожара и снижения индивидуального пожарного риска за счет обеспечения минимальной времени эвакуации из зоны пожара. Большинство систем не учитывает конфигурацию оборудования, являющегося потенциальным источником огня, наличие нарушения требований пожарной безопасности, не относящиеся к нарушениям по отношению к системам противопожарной защиты. Кроме того, часть решений невозможно использовать без постоянного соединения с сетью Интернет, что затрудняет их применение на удалённых объектах и ставит под сомнения конфиденциальность передаваемых данных. Помимо этого, результаты расчёта можно использовать только для декларирования пожарной безопасности, так как ни одна программа не предусматривает формирование отчётов и детализацию результатов расчёта. Также ни одна программа не предлагает пошаговый расчёт риска, что увеличивает время обучения использованию программы и способствует увеличению числа ошибок.

## 1.5 Методы оценки рисков на железнодорожном транспорте

Поскольку в основе безопасности любой технической системы лежит надежность её элементов, то исследование вопросов надежности и рисков на определённой стадии технического развития железнодорожного транспорта стало ключевой задачей. В 2008 г. в работе [75] был приведен обзор создания и внедрения комплексной автоматизированной системы учета, контроля, устранения отказов технических средств и анализа их надежности (КАСАНТ) в ОАО «РЖД». Разработка новых подходов к оценке безопасности и надежности позволила создать в ОАО «РЖД» систему управления ресурсами и рисками на железнодорожном транспорте на основе анализа состояния эксплуатационной надежности и безопасности объектов и процессов (проект УРРАН) [76-79].

В основе УРРАН лежит методология, позволяющая учитывать причины, приводящие к появлению нежелательных событий (отказов, случаев нарушения безопасности движения и т.п.). Отдельное место в этих исследованиях занимает анализ предотказных состояний, установление критериев перехода предотказа в отказ, достижение предельных состояний, при которых целесообразно провести ремонтные работы. Для учёта этих факторов при оценке пожарных рисков объектов железнодорожного транспорта необходима разработка математических моделей, позволяющих получить новые результаты по сравнению с методиками, утвержденными МЧС.

При этом новая модель оценки пожарных рисков должна отвечать требованиям стандартов УРРАН: она должна позволять оценивать как вероятности (частоту) пожара, так и последствия с учётом характеристик объекта защиты. Для определения вероятностных и временных исходных данных при построении матриц рисков наиболее перспективными являются графовые методы оценки надежности и функциональной безопасности объектов и систем с большим числом состояний в исследованиях [80, 81]. Эти методы позволяют учитывать то, что объект не пребывает стационарно в одном состоянии или группе состояний, а с

течением времени переходит из одного состояния в другое (из безопасного в пожароопасное и др.).

## 1.6 Постановка задачи научного исследования

На законодательном уровне в Федеральном законе №123-ФЗ от 22.07.2008 г. «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» установлена необходимость создания как минимум двух систем управления пожарной безопасностью:

1. Система противопожарной защиты, предназначенная для защиты людей и имущества от воздействия опасных факторов пожара путем снижения динамики нарастания опасных факторов пожара, эвакуации людей и имущества, тушения пожара.

2. Система предотвращения пожаров, предназначенная исключать условия образования горючей среды и (или) исключать возможности появления источников зажигания.

На ЖДТ создание и поддержание функционирования системы противопожарной защиты на стационарных объектах регулируется законодательством Российской Федерации, на передвижных объектах – стандартами предприятия.

Вторая система ориентирована на снижение количества пожаров за счёт решений, принятых на этапе проектирования и капитального строительства. У ОАО «РЖД» дополнительно существует контрольный орган – Федеральное государственное предприятие – Ведомственная охрана железнодорожного транспорта (ФГП ВОЖДТ). В функции ФГП ВОЖДТ входит выявление нарушений требований пожарной безопасности, проведение пожарно-технических обследований, выдача предписаний о приостановки эксплуатации объектов ЖДТ. Несмотря на обладание информацией о фактическом состоянии объектов защиты, не существует нормативной базы для использования этой информации в целях прогнозирования состояний пожарной опасности и пожарных рисков. Решение о запрете эксплуатации объектов ЖДТ принимается инспекторами, которые выступают в качестве экспертов. Такая система требует высокой квалификации экспертов и подвержена существенному влиянию человеческого фактора. Кроме

того, инспекторы (ФГП ВОЖДТ или МЧС) не учитывают условия эксплуатации объектов: интенсивность работы, план ремонтов, работы по текущему содержанию и др. Таким образом, одной из задач диссертационного исследования является математическое моделирование пожарных рисков объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, в т.ч. разработка метода расчета вероятности возникновения пожароопасного состояния объекта ЖДТ на стадии его эксплуатации. Систематизация информации о состояниях объектов защиты и ранжирования этих состояний по степени влияния на вероятность возникновения пожара позволит снизить долю влияния человеческого фактора при оценке объектов. Другая задача нового метода – обеспечение возможности сопоставлять объекты одного типа из различных регионов друг с другом, что существенно повысит качество анализа пожарных рисков. Повышение качества анализа может быть достигнуто за счёт поиска причин, по которым объекты, обладающие одними и теми же проектными характеристиками, могут иметь разные уровни пожарной опасности.

Система управления пожарными рисками, основанная на формализованном описании опасных состояний и состояний, им предшествующим, позволит управлять фактическим состоянием ПИО через циклы технического обслуживания и ремонта. Таким образом, мы сможем перейти от системы, основанной на реагировании на нарушения, к системе, предотвращающей появление нарушений и опасных состояний. Интеллектуализация процессов управления пожарными рисками за счет разработки нормативно-методической базы проактивной системы также является задачей диссертационного исследования, а именно разработка методик управлениями пожарными рисками стационарных и передвижных объектов на основе их фактических состояний.

Как было отмечено выше, у ОАО «РЖД» уже имеется система диагностирования нарушений требований пожарной безопасности и разбора случаев пожара. Эта система содержит базу данных с результатами проверок, причинами запретов эксплуатации, причинами пожаров. Этот опыт имеет большое значение для обеспечения эффективного функционирования системы управления

пожарными рисками. Именно информация о фактическом состоянии объектов должна оказывать наибольшее влияние при принятии решения об уровне пожарного риска. Однако в настоящее время эта система проверок подвержена большому влиянию человеческого фактора. Для того, чтобы снизить это влияние и повысить достоверность сбора данных, необходима разработка способ и алгоритма диагностирования неисправностей стационарных и передвижных объектов ЖДТ, приводящих к пожарным рискам. Это и является отдельной задачей диссертационного исследования.

ОАО «РЖД» отвечает за пожарную безопасность нескольких тысяч объектов защиты. Ручная обработка информации о них, а также хранение отчетности в бумажном виде может оказать существенное влияние на систему управления пожарными рисками. В первую очередь это коснется оперативности принятия решений, своевременного учёта изменения условий эксплуатации объектов, возможных человеческих ошибок. Для эффективного управления таким количеством объектов необходима автоматизация процессов расчёта рисков и формирования отчётности с информацией, на основе которой возможно принятие решения об безопасности эксплуатации объектов ЖДТ. В связи с тем, что сбор информации о состояниях пожарной безопасности объектов защиты связан с физическим осмотром, целесообразно использовать мобильные устройства для ввода данных. Это позволит исключить дублирование при регистрации информации. Разработка мобильного программно-аппаратного комплекса для диагностирования пожарной опасности и прогнозирования пожарных рисков на объектах ЖДТ является центральной задачей диссертационного исследования. Следующая задача состоит в апробации автоматизированной системы управления пожарными рисками на стационарных и передвижных объектах ОАО «РЖД».

Выбор методов исследования зависит от уже имеющегося мирового и российского опыта оценки пожарных рисков, а также опыта оценки рисков в ОАО «РЖД».

В настоящее время в ОАО «РЖД» разработана и внедрена система УРРАН (параграф 1.5), и разрабатываемая система управления пожарными рисками

должна учитывать требования стандартов УРРАН в части оценки надежности технических средств и оценки рисков.

В качестве теоретической основы для создания методов оценки пожарных рисков в ОАО «РЖД» в соответствии со стандартами УРРАН, должен быть принят принцип *ALARP* (*As Low As Reasonably Practicable* – риск настолько низок, насколько это практически разумно). С помощью областей *ALARP* строится матрица рисков, которая реализует сочетание частоты (вероятности) события пожара и ущерба от него. Для определения вероятностных и временных исходных данных при построении матриц рисков наиболее перспективные графовые методы оценки надежности и функциональной безопасности объектов и систем с большим числом состояний [80, 81]. Эти методы позволяют учитывать то, что объект не пребывает стационарно в одном состоянии или группе состояний, а с течением времени переходит из одного состояния в другое (из безопасного в пожароопасное, предопасное состояние и др.).

В итоге сформулированы следующие цели и задачи диссертационного исследования, приведенные во Введении.

## Выводы по Главе 1

1. Существующая модель принятия решения о запрете эксплуатации объектов железнодорожного транспорта из-за состояний пожарной опасности основана на оценках экспертов ФГП ВОЖДТ или МЧС России. Создание методов и моделей прогнозирования состояний пожарной опасности объектов на основе их фактического состояния позволит владельцам объектов защита самостоятельно оценивать опасность имеющихся состояний и своевременно проводить организационно-технические мероприятия по устранению и предотвращению появления опасных состояний.

2. Установлено два периода развития методов и моделей оценки интегральных показателей пожарной опасности объектов на основе их фактических характеристик. Основным результатом первого периода (с 1991 по 2008 г.) является разработка критериев выбора эффективных мероприятий по обеспечению пожарной безопасности объектов на основании моделирования воздействия поражающих факторов пожара на людей и материальные ценности и методов оценки индивидуального пожарного риска. С 2008 г. разрабатываются модели оценки влияния средств аварийной эвакуации на величину пожарного риска, а также новые методы оценки пожарных рисков с учётом социально-экономических критериев и целей владельцев объектов защиты.

3. Индексные методы оценки пожарных рисков, используемые в странах Европы и Америки, учитывают функциональное назначение помещений, но их применение затруднено из-за различий между отечественной и западной классификациями пожарной опасности веществ и материалов. Кроме того, эти методы не предусматривают использование информации о нарушениях требований пожарной безопасности (ТПБ) и фактическом состоянии объектов.

4. При оценке пожарных рисков объектов ЖДТ необходим учёт факторов, влияющих не только на безопасность людей в случае возникновения пожара, но на и вероятность появления источника зажигания. Разработка метода прогнозирования пожарного риска объектов ЖДТ является сложной научно-технической задачей, требующей изучения последствий нарушений ТПБ,

выявления пожароопасных состояний, не являющихся нарушениями ТПБ, и разработке модели оценки априорной вероятности пожара.

5. Единовременное управление пожарной безопасностью нескольких тысяч объектов возможно только в условиях автоматизированного сбора данных о состояниях объектов железнодорожного транспорта и расчёта пожарного риска.

## **ГЛАВА 2. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОЖАРНЫХ РИСКОВ НА ОБЪЕКТАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

### **2.1 Способ математического моделирования появления пожарного риска объекта железнодорожного транспорта на стадии его эксплуатации**

Показатели производственной безопасности делятся на два типа: фактические и расчётные (плановые показатели). К фактическим показателям относятся: коэффициенты частоты производственного травматизма, объемы страховых выплат, частоты пожаров, монетарный ущерб от пожара, плата за негативное воздействие на окружающую среду и т. д. Фактические показатели могут быть представлены как в абсолютных, так и в относительных величинах, их значения определяются путём прямых измерений.

Расчётные показатели безопасности движения, как правило, относятся к категории комплексных или интегральных показателей. Наиболее эффективным, в соответствии с отечественным и мировым опытом, из группы расчётных показателей, является комплексный показатель, сочетающий в себе количественные и качественные оценки – показатель риска. Широко используется в качестве инструмента оценки риска матрица рисков [75 – 79]. Последствия реализации риска всегда носят негативный характер, и для эксплуатирующихся объектов железнодорожного транспорта хорошо известны. Типовые уровни тяжести последствий для железнодорожного транспорта рекомендуются ГОСТ 33433-2015.

При оценке вероятности появления нежелательного события мы сталкиваемся с проблемой выбора метода расчёта. В настоящее время существует множество методов оценки факторов риска, которые делятся на три крупные группы – экспертные, статистические и гибридные. Важнейшей задачей при выборе метода оценки вероятности появления нежелательного события является обеспечение практической применимости результатов, а это означает, что модель оценки должна учитывать состояния контролируемых параметров системы.

Наилучшим образом с этой задачей справляются гибридные модели оценки вероятности появления пожара, в которых экспертные оценки подкрепляются статистическими.

Автоматизированная система, позволяющая управлять вероятностью появления опасных происшествий и аварий, должна основываться на информации о процессах, реализуемых на объектах ЖДТ, и на информации о состояниях, которые сопровождаются авариями и нежелательными событиями. Способ, предлагаемый в данной работе, ориентирован на создание наглядного, хорошо формализованного метода оценки вероятности перехода системы в опасное состояние.

### **2.1.1 Множества состояний объектов железнодорожного транспорта**

Для сложной системы, которой является объект ЖДТ, характерны состояния отказа отдельных элементов и даже целых подсистем с сохранением работоспособности системы в целом. Такие состояния системы во многих случаях снижают характеристики её эффективности. Это свойство объекта ЖДТ оказывает особое влияние на постановку и решение задачи обеспечения безопасности. Например, с точки зрения обеспечения пожарной безопасности отдельными состояниями системы будут «нарушение требования Правил противопожарного режима (ППР)» и «появление возгорания из-за нарушения требований ППР». Вероятностные характеристики этих состояний будут отличаться. При этом, с точки зрения управления пожарной безопасностью объекта, разумно оценивать не только вероятность появления нарушения ТПБ или пожароопасного состояния, но и вероятность его своевременного устранения. Такой подход образует дополнительные связи между различными состояниями. Формализуем понятие «состояние безопасности» с помощью образов теории множеств. С учетом опыта классификации множеств состояний объектов, влияющих на безопасность [80] выделено три множества состояний:

— множество состояний соответствия требованиям  $S_H$  – это состояния системы, при которых отсутствует опасность для имущества, жизни, здоровья

работников, третьих лиц и соблюдены требования технической, технологической документации, условиями эксплуатации (состояния соответствия нормам);

— множество состояний, дестабилизирующих пожарную безопасность,  $S_{\text{риск}}$  – состояния, не соответствующие требованиям пожарной безопасности, из которых возможен переход в опасное состояние;

— множество состояний пожарной опасности  $\bar{S}_{\text{ПБ}}$  – совокупность состояний, каждое из которых может привести к причинению вреда имуществу, здоровью и жизни работников, а также третьих лиц. Наблюдение за частотой реализации опасных состояний (пожаров, возгораний) обычно и образует статистическую базу фактических показателей.

Объединение множеств  $S_{\text{Н}}$  и  $S_{\text{риск}}$  образуют множество не пожароопасных (неопасных) состояний  $S_{\text{ПБ}}$ . В этом объединённом множестве можно выделить подмножество состояний  $S_{\text{шаг}}$  – состояния, из которых можно перейти в опасное за один шаг.

С точки зрения надежности выделяются следующие множества [64] и ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике (ССНТ). Основные понятия. Термины и определения»:

Работоспособное состояние  $S_{\text{р}}$  – состояние системы, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствует требованиям технической документации.

Неработоспособное состояние  $\bar{S}_{\text{р}}$  – состояние системы, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям технической документации.

На Рисунке 2.1 приведены диаграммы множеств состояний безопасности системы.

Процесс развития состояния системы (объекта) является марковским и будущие состояния зависят от прошлых состояний только через настоящее состояние  $s_i$ . Другими словами, выбор будущего состояния  $s_j$  зависит от настоящего состояния и не зависит от того, когда и каким образом система перешла в настоящее состояние [81]. Для однородной Марковской цепи переходные

вероятности не зависят от номера шага и остаются неизменными в течение всего времени функционирования системы.

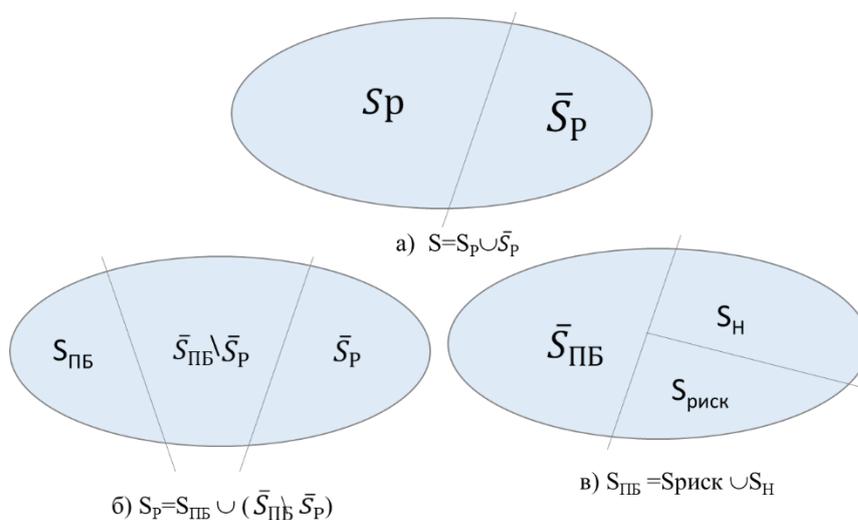


Рисунок 2.1 – Состояния безопасности системы

Оценка показателей процессов, для которых время пребывания в каждом состоянии  $s_i$  постоянное или мгновенное осуществляется при известных значениях переходных вероятностей (информация об определении этих значений приведена в параграфе 2.4.1). Анализ процессов, время пребывания в каждом состоянии которого непрерывно и случайно оценка может осуществляться на основе известных интенсивностей событий. К таким процессам, например, относятся процессы появления отказов на тяговых подстанциях [82].

В данной работе мы акцентируем внимание на состояниях множеств  $S_{\text{ПБ}}$ ,  $S_{\text{риск}}$ ,  $\bar{S}_{\text{ПБ}}$ .

На переход системы из состояния множества  $S_{\text{Н}}$  в состояние множества  $S_{\text{риск}}$  влияют следующие факторы:

1. условия эксплуатации объектов, в том числе температура, запыленность окружающей среды;
2. достаточность ресурсов для проведения технического обслуживания и ремонта;
3. качество технического обслуживания и ремонта;

4. надежность технических средств и оборудования;
5. человеческий фактор.

Перейдя в дестабилизирующее безопасное состояние система может вернуться в состояния множества  $S_H$  за счет:

1. изменения состояния узла (части объекта) при проведении ремонта, технического обслуживания;
2. изменения условий эксплуатации;
3. замены узла (части объекта).

На вероятности перехода в состояния множества  $S_H$  влияют такие факторы как:

1. периодичность осмотра объекта;
2. компетенция специалистов, осуществляющих эксплуатацию и контроль состояния;
3. время до ближайшего технического обслуживания, ремонта на котором возможно устранение дестабилизирующего состояния.

Переходы между дестабилизирующими состояниями определяются, в большей мере физическим устройством системы и зависят от:

1. физических свойств материалов;
2. надежности оборудования;
3. условий эксплуатации.

Вероятность перехода из состояния множества  $S_{\text{риск}}$  в состояние множества  $\bar{S}_{\text{ПБ}}$  зависит от всех вышеприведенных факторов.

### **2.1.2 Математическое моделирование описания развития пожарной опасности объекта железнодорожного транспорта с помощью графа состояний**

События возникновения пожаров, аварий с экологическими последствиями, события травм при проведении работ носят случайный характер [83]. Представим исследуемую систему со сформулированными ранее множествами состояний с помощью ориентированного графа состояний  $G(S, H)$ , где  $S$  – конечное множество состояний системы;  $H$  – конечное множество дуг между вершинами  $i, j$  (состояниями  $S_i, S_j$ ). Развитие системы можно описать следующим образом: если

система находится в состоянии  $S_i$ , то с вероятностью  $p_{ij}$  она сможет перейти в состояние  $S_j$ . Критерием опасного события является переход системы в множество опасных состояний  $\bar{S}_{ПБ}$  [83].

При построении графа безопасности системы должны быть учтены следующие требования:

— из каждого состояния множества  $S_{ПБ}$  возможен переход в состояние множества  $S_{риск}$  или  $\bar{S}_{ПБ}$ .

— из каждого состояния множества  $S_{риск}$  система переходит либо в состоянии  $S_{ПБ}$ , либо в состоянии  $\bar{S}_{ПБ}$ .

Приведем пример описания состояния пожарной безопасности помещения стационарного объекта с помощью графа состояния (Таблица 2.1):

$S$  – полное множество состояний объектов,  $S = \{S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ ;

$S_H$  – множество состояний соответствия нормам,  $S_H = \{S_0\}$ ;

$S_{риск}$  – множество дестабилизирующих безопасность состояний,  $S_{риск} = \{S_1, S_2, S_3\}$ ;

$\bar{S}_{ПБ}$  – множество опасных состояний,  $\bar{S}_{ПБ} = \{S_4, S_5\}$ .

Таким образом,  $S = S_{ПБ} \cup \bar{S}_{ПБ}$ ,  $S_{ПБ} = S_{риск} \cup S_H$ .

Таблица 2.1 – Пример множеств состояний пожарной безопасности кабельных изделий на стационарных объектах.

Множество	№	Обозначение	Описание	Нарушенный нормативный документ
$S_H$	0	$S_0$	Кабели/провода не повреждены	
$S_{риск}$	1	$S_1$	Открыто проложенные кабели/провода (без защитных оболочек/труб/коробов) проложены в местах, где возможны механические повреждения	ПУЭ 2.1.47
	2	$S_2$	Крутые изгибы, микро-повреждения (невидимые повреждения изоляции)	
	3	$S_3$	Эксплуатация кабеля/провода с видимым нарушением изоляции	ППР 42а)
$\bar{S}_{ПБ}$	4	$S_4$	Нагрев кабелей из-за роста переходного сопротивления	
	5	$S_5$	Короткое замыкание и оплавление изоляции, искры КЗ	

В Таблице 2.2 приведены значения вероятностей переходов за один шаг из  $i$ -го состояния в состояние  $j$  ( $p_{ij}$ ). Эти вероятности являются априорными, они задаются экспертным путём на основе анализа случаев возникновения и развития пожаров.

На Рисунке 2.2 приведен граф состояний пожарной безопасности кабельной продукции в помещении стационарного объекта [83].

Таблица 2.2 – Матрица переходных вероятностей

		Состояния						
		0	1	2	3	4	5	$\Sigma$
с о с т о я н и я	0	0,7	0,3	0	0	0	0	<b>1</b>
	1	0,5	0	0,3	0,2	0	0	<b>1</b>
	2	0	0	0,7	0	0,3	0	<b>1</b>
	3	0	0	0	0,3	0,2	0,5	<b>1</b>
	4	0	0	0,3	0	0,7	0	<b>1</b>
	5	0	0	0	0	0	1	<b>1</b>

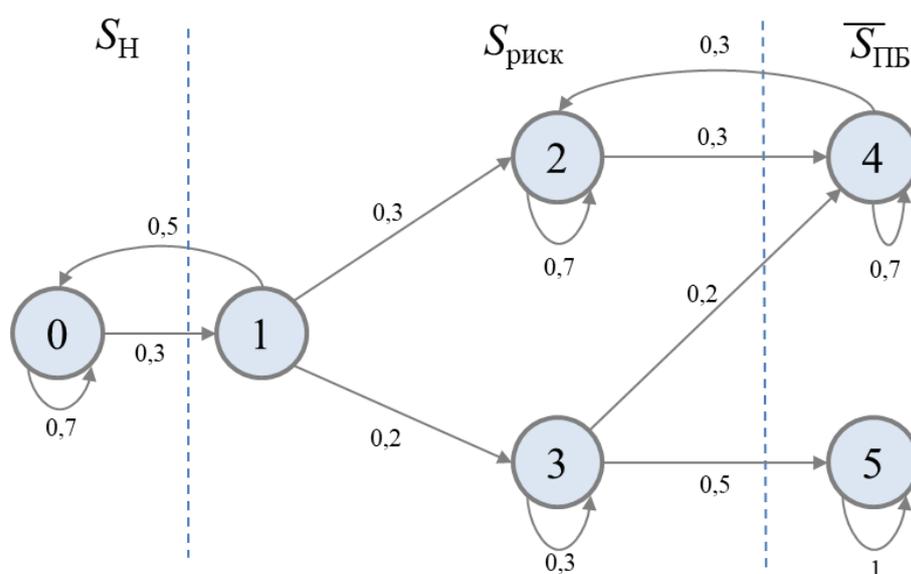


Рисунок 2.2 – Граф состояний пожарной безопасности в помещении стационарного объекта

Такая формализация позволит составлять классификаторы пожароопасных состояний, оценивать вероятности перехода системы из конкретного неопасного состояния в любое опасное и последствия таких переходов. На основании проведенных расчётов должны приниматься решения об изменении значений переходных вероятностей за счёт внедрения систем противопожарной защиты, проведения предупредительных ремонтов и других организационно-технических мероприятий.

Топологические понятия, используемые для математического моделирования [81, 83]:

*путь* – цепь последовательно соединенных однонаправленных дуг с началом в состоянии  $i$  и окончанием в состоянии  $j$ , вес  $k$ -го пути  $l_k^{ij}$  определяется выражением:

$$l_k^{ij} = \prod_{i,r,j \in S} p_{ir} \cdot p_{rj}, \quad (1)$$

где  $p_{ir}$  – вероятность перехода за один шаг из состояния  $i$  в состояние  $r$ ;

*замкнутый контур* – это цепь последовательно соединенных однонаправленных дуг, в которой выход конечной вершины в цепи соединен с начальной вершиной в цепи. Вес  $j$ -го контура определяется выражением:

$$C_j = \prod_{i,j \in S} p_{ij} \cdot p_{ij}, \quad (2)$$

где *петля* – частный случай замкнутого контура, в ней входящие и исходящие дуги сливаются в одну дугу, вес петли  $C_j = p_{jj}$ ;

*разложение графа* – часть графа, не содержащая выделенных вершин и связанных с ней дуг; вес разложения  $\Delta G_i$  рассчитывается с учетом исключения из графа вершины  $i$  и связанных с ней дуг; вес разложения  $\Delta G_{\bar{S}_{\text{ПБ}}}$  рассчитывается с учетом дополнительного исключения из графа вершин множества  $\bar{S}_{\text{ПБ}}$  и связанных с ними дуг; вес разложения  $\Delta G_k^f$  рассчитывается с учётом исключения из графа вершины  $f$ , а так же вершин, расположенных на  $k$ -м пути из начальной вершины в вершину  $i$  и связанных с ними дуг;

*вес разложения (опредетель)* находится по формуле Мезона:

$$\Delta G = 1 - \sum_j C_j + \sum_{rj} C_r \cdot C_j - \sum_{irj} C_i \cdot C_r \cdot C_j + \dots, \quad (3)$$

Предложенный способ позволяет описывать как состояние таких объектов, как кабели, так и более сложных технических устройств – оборудования тяговой подстанции [84].

## **2.2 Концепция оценки рисков на стационарных и передвижных объектах железнодорожного транспорта**

В 2018 г. эксплуатационная длина железных дорог ОАО «РЖД» составила 85,5 тыс.км. По данным годовой отчетности холдинга РЖД этот показатель выводит Российскую Федерацию на 4-е место по протяженности железных дорог. Россия также занимает одно из первых мест в мире по численности грузового вагонного парка. Доля железнодорожных перевозок в суммарном грузообороте всех видов транспорта общего пользования России в последние годы составляет 80-85% [85]. Функционирование железнодорожного транспорта обеспечивают более 23 893 единиц подвижного состава. Более тысячи стационарных объектов различного функционального назначения: вокзалы, посты электрической централизации, склады, информационно-вычислительные центры, здания локомотивных депо, тяговых подстанций и др. Для управления безопасностью таких объектов необходима распределенная система, позволяющая учитывать специфику каждого объекта. При этом важно влияние на безопасность пассажиров и работников, на функционирование железных дорог в целом. Например, согласно статистике ОАО «РЖД» с 2003 г. по 2017 г. пожары на малолюдных постах электрической централизации (постов ЭЦ) не сопровождались ущербом людям, однако приводили к перерывам в движении поездов, повреждению сложного оборудования.

Именно такие последствия на объектах, связанных с обеспечением движения, важны при оценке пожарного риска. Для вокзалов, железнодорожных платформ и других объектов с массовым пребыванием людей первостепенным является безопасность пассажиров и уровень индивидуального пожарного риска.

Таким образом, последствия пожаров на объектах могут быть различны (в абсолютных единицах измерения). Для сопоставления таких объектов удобно переходить от количественных показателей к качественным путем разбиения шкалы на несколько интервалов. Аналогично обстоят дела с частотой (или вероятностью) пожара. Любое горение технологического оборудования

(оборудование постов ЭЦ, узлы тягового подвижного состава) приводит к приостановке технологического процесса, даже если существенный ущерб материальным ценностям не нанесен [9].

На основе вышесказанного для каждого типа объекта в зависимости от его функций, от массового присутствия людей должны быть установлены критерии допустимых значений последствий и частот (вероятностей) пожара. Допустимые значения должны позволять ранжировать объекты по приоритетности устранения пожароопасных состояний и нарушений требований пожарной безопасности. Так как необходимо ранжировать множество объектов, на первом этапе целесообразно использовать наиболее общие показатели, такие как частота пожаров и размер последствий на группе объектов одного типа. Это позволит выявить и количественно оценить наиболее опасные объекты, объединенные общим признаком: конструкцией, годом создания, условиями эксплуатации. В дальнейшем для каждого объекта выделенных групп должны разрабатываться мероприятия по уменьшению уровня опасности и пожарного риска, исходя из их потребностей. Такой подход позволит обеспечить переход на проактивную модель управления пожарной безопасностью, основанную на реакции на состояние объекта. Именно реакция на фактическое состояние объекта и проведение компенсирующих опасность мер должны предотвратить появление нежелательных событий.

Для того, чтобы разработанная система управления пожарными рисками объектов ЖДТ могла удовлетворить потребности владельцев объектов защиты и специалистов, ответственных за пожарную безопасность, на различных уровнях управления ОАО «РЖД», выделены следующие принципы оценки рисков на стационарных и передвижных объектах железнодорожного транспорта:

1. принцип централизации и сопоставимости объектов: объекты должны быть объединены в группы (кластеры), для которых возможно применение статистических критериев оценки рисков. Показатели групп должны быть в единых единицах измерения. Единицы измерения пожарного риска групп должны быть едиными для обеспечения межгруппового сравнения.

2. принцип децентрализации и доказательного анализа: критерии опасности должны быть установлены с учётом технологических процессов, реализуемых на объекте, условий эксплуатации и других характеристик, влияющих на вероятность возникновения нежелательного события.

3. принцип *ALARP*: допустимый уровень риска в соответствии с принципом *ALARP* – это такой уровень риска, для которого затраты на его достижение являются экономически эффективными.

4. принцип комплексности: пожарный риск должен учитывать как частоты (вероятность) пожара, так и его последствия<sup>10</sup>;

5. принцип обратной связи: мероприятия по обеспечению пожарной безопасности должны планироваться на основе фактической потребности объекта, а не только норм его оснащения.

Для того, чтобы определить перечень инструментов, с помощью которых могут быть реализованы эти принципы, необходимо проанализировать природу величины «количество пожаров». Для этого необходимо провести предварительный анализ, который позволит сделать вывод о наличии регрессионной зависимости во временном ряду количества пожаров. Для этого был использован критерий восходящих и нисходящих серий. По результатам расчётов (Приложение А) установлено, что количество пожаров на таких объектах ЖДТ, как тяговый подвижной состав, посты электрической централизации, тяговые подстанции, вокзалы – случайная величина. Так как на вышеуказанные объекты приходится более 70% всех пожаров на ЖДТ, будем считать, что для всех объектов ЖДТ количество пожаров является случайной величиной.

Для реализации вышеизложенных принципов и с учётом того, что количество пожаров – случайная величина, предложен алгоритм оценки рисков объектов железнодорожного транспорта [86] (Рисунок 2.3), включающий в себя 3 блока: диагностирование, прогнозирование, изменение состояния.

---

<sup>10</sup> Последствия по убыванию приоритета предотвращения: ущерб людям, ущерб бизнесу, ущерб материальным ценностям



Рисунок 2.3 – Алгоритм оценки пожарных рисков на стационарных и передвижных объектах ОАО «РЖД»

Инструменты реализации концепции делятся на две группы:

1. инструменты апостериорной оценки пожарного риска, позволяющие оценить уровень пожарного риска объектов на основании статистики прошлых лет (для реализации шага 1 алгоритма). К ним относятся матрица рисков, инструменты статистической оценки частот, последствий пожаров. Подробнее об инструментах апостериорной оценки смотри в подразделе 2.3;

2. инструменты оценки априорной пожарного риска на основании фактических характеристики объектов, подробнее смотри в подразделе 2.4.

Алгоритм оценки пожарных рисков на стационарных и передвижных объектах ОАО «РЖД» (алгоритм оценки рисков) предназначен для оценки эксплуатирующихся объектов ЖДТ, на которых наблюдались пожары. Шаги алгоритма оценки рисков для объектов различного функционального назначения могут быть реализованы с учётом их специфики, в частности, различия могут

касаться: матриц рисков, способов оценки вероятности (или выборочной частоты) пожаров, критериев аудита, методов прогнозирования пожарной опасности, критериев допустимого риска. При этом единство терминологии и последовательности действий обеспечивает возможность управления множеством объектов.

## **2.3 Апостериорная оценка пожарного риска объектов железнодорожного транспорта**

### **2.3.1 Апостериорная оценка вероятности пожара на стационарных и передвижных объектах железнодорожного транспорта**

Вероятность возникновения пожара<sup>11</sup> – математическая величина возможности появления необходимых и достаточных условий возникновения пожара (загорания). Условия возникновения пожара представляют собой набор непосредственных причин пожаров или, в терминах теории вероятности, элементарных исходов, множество которых благоприятствуют появлению события «пожар». При этом набор элементарных исходов для различных объектов будет отличаться. Самый очевидный пример: на тепловозах 12% пожаров происходит из-за неисправностей турбокомпрессора. Для электровозов доля пожаров по аналогичной причине – 0%, поскольку в электровозах нет турбокомпрессоров. Конструкционные отличия также имеют тепловозы различных серий. Однако конструкция – не единственный критерий различия между сериями тепловозов. Не менее важное влияние на количество пожаров оказывает объем эксплуатации тепловозов или иначе – эксплуатационный парк. Для проверки гипотезы о случайности количества пожаров на объектах ОАО «РЖД» применен критерий серий (Приложение А, раздел А.1). По результатам анализа, установлено, что для тягового подвижного состава, тяговых подстанций, постов ЭЦ, железнодорожных вокзалов количество пожаров является случайной величиной.

Объекты (узлы, оборудование), которые могут загореться на различных сериях локомотивов различны (в т.ч. количество пожароопасных узлов), что порождает различные наборы элементарных исходов. Поэтому вероятность пожара на локомотиве каждой серии необходимо вычислять отдельно. Аналогична ситуация со стационарными объектами различного функционального назначения.

---

<sup>11</sup> ГОСТ 12.1.033-81 ССБТ. Пожарная безопасность. Термины и определения

Причины появления пожара на постах электрической централизации и вокзалах различны в силу разницы реализуемых технологических процессов.

### 2.3.1.1 Определение закона распределения случайной величины «пожар»

Для оценки вероятности возникновения пожара необходим выбор соответствующей математической модели. Выше было установлено, что количество пожаров является случайной величиной. На данном этапе исследования стоит добавить, что это дискретная случайная величина (по естественным причинам). В вариационном ряде количества пожаров  $x_i$  на группе объектов ЖДТ в  $i$ -й период принимает целочисленные значения. При подборе закона распределения случайной величины необходимо руководствоваться не только классическими статистическими критериями, но и логикой, основанной на знаниях об идентичности объектов железнодорожного транспорта и условий их эксплуатации.

В работе [87] приведены исследования вероятности возникновения пожара на тепловозах различных серий, начинающиеся с анализа условий применимости схемы Бернулли для анализа случаев пожара по эмпирическим данным (Таблица 2.3).

Согласно принятой модели, объектом наблюдения является месяц (а результатом испытания – наличие пожара), в котором мы свидетельствуем о наличии или отсутствии пожара на локомотивах, имеющих эксплуатационный парк объемом  $N$ .

По формуле Бернулли вероятность  $P_n(k)$  возникновения ровно  $k$  успехов равна<sup>12</sup>:

$$P_n(k) = C_k^n \cdot p_j^{*k} \cdot (1 - p_j^*)^{n-k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} \cdot p_j^{*k} \cdot (1 - p_j^*)^{n-k}, \quad (4)$$

Если пожар является редким событием, то целесообразно проводить проверку на соответствие Пуассоновскому закону распределения.

<sup>12</sup> Здесь и далее индекс  $j$  при  $p^*$  определяет серию локомотивов, а индекс  $i$  характеризует параметр распределения внутри серии

Таблица 2.3 – Пример проверки соответствия условиям применимости схемы Бернулли и данных расчета

Условия применимости схемы	Наблюдения	Соответствие условию
Каждое испытание имеет ровно два исхода: "успех" и "неудача"	Каждое испытание имеет ровно 2 исхода: "был пожар" и "не было пожара"	Соответствует
Независимость испытаний: результат очередного эксперимента не должен зависеть от результатов предыдущих экспериментов	Независимость испытаний: возникновение пожара не зависит от того, был ли ранее пожар. Возникновение пожара зависит от проведения ремонта	Соответствует
Вероятность успеха должна быть постоянной (фиксированной) для всех испытаний ( $p_j^*$ )	Вероятность возникновения пожара на объекте ЖДТ - постоянная величина для заданного объекта ( $p_j^*$ ), в соответствии со статистическими наблюдениями	Соответствует

### 2.3.1.2 Проверка статистических гипотез

Для проверки предположений, касающихся определения соответствия выборки определенному закону распределения, используется механизм проверки статистических гипотез. Статистической гипотезой называют некоторое предположение о виде закона распределения или о значениях неизвестных параметров закона распределения в генеральной совокупности [88, 89].

Схема проверки статистической гипотезы о соответствии возникновения пожаров биномиальному закону распределения:

#### 1. Формулировка нулевой и альтернативной гипотезы.

Высказываемая гипотеза о соответствии выбранному закону распределения (в нашем случае одному из дискретных законов) с доверительной вероятностью  $\alpha$  называется нулевой гипотезой  $H_0: \{P = P_0\}$ . В результате статистической проверки нулевая гипотеза либо принимается (считается верной), либо отклоняется (считается неверной).

Кроме нулевой гипотезы определена альтернативная гипотеза  $H_1: \{P \neq P_0\}$ , которая будет приниматься, если отклоняется нулевая гипотеза – гипотеза о несоответствии выбранному распределению:

2. Выбор критерия для проверки гипотезы и вычисление его наблюдаемого значения.

Для проверки гипотез пользуются специальными критериями, которые рассчитываются с использованием наблюдаемых данных (по выборке) и подчинены одному из стандартных законов распределения (Стьюдента,  $\chi^2$  и др.)<sup>13</sup> В данной работе использовался критерий  $\chi^2$  Пирсона, т.к. мы имеем дело с дискретным распределением.

Предполагается, что  $\overline{X}_n$  – случайная выборка объема  $n$  (8 лет при наблюдении за тепловозами) из генеральной совокупности непрерывной случайной величины  $X$  [88]. Пусть теперь наблюдается дискретная случайная величина  $X$  (количество месяцев с пожарами в году), принимающая  $i$  различных значений  $u_1, \dots, u_i$  с положительными вероятностями  $p_1, \dots, p_i$ , (5) и (6):

$$P\{X = u_k\} = p_k, k = \overline{1, l}, \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^i p_k = 1, \quad (6)$$

Для проверки гипотезы о биномиальном распределении расчет  $p_k$  осуществлялся по формуле (1).

Допустим, что в выборке число  $u_k$  встретилось  $n_k(\overline{x}_n)$  раз,  $k = \overline{1, l}$ . Отметим, что  $\sum_{k=1}^i n_k(\overline{x}_n) = n$ .

Тогда справедлива теорема Пирсона<sup>14</sup> для  $\nu = i - 1$  степеней свободы (7):

$$\chi_\nu^2 = \sum_{k=1}^i \frac{(n_k(\overline{x}_n) - np_k)^2}{np_k}, \quad (7)$$

Если выполняется неравенство (8):

$$\chi_\nu^2 \leq \chi_{\alpha, \nu}^2, \quad (8)$$

то гипотеза о соответствии биномиальному закону распределения принимается с доверительной вероятностью  $\alpha$  ( $\alpha = 0,95$ ).

Пример расчета проверки для локомотивов серии 2ТЭ116 приведен в Таблице 2.4.

<sup>13</sup> Р 50.1.033-2001 Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть 1. Критерии типа хи-квадрат.

<sup>14</sup> Обоснование преимущества критерия Хи-квадрат над другими при проверки простых гипотез приведено в параграфе 2.2.1.7.

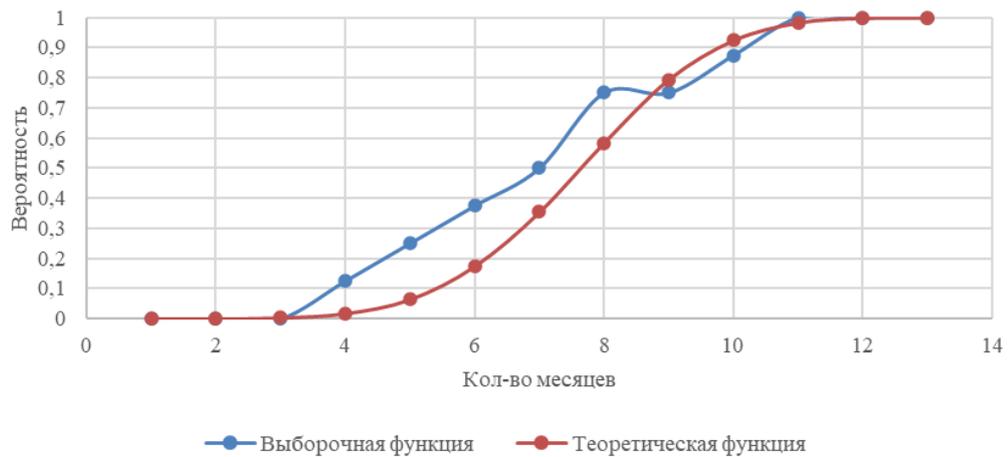
Примем  $\alpha = 0,95$ . В нашем случае количество степеней свободы  $\nu = i - 1 = 12 - 1 = 11$  ( $i$  - число различных значений  $u_i$ ). Отсюда  $\chi_{\alpha,\nu}^2 = 19,67$ . Таким образом, неравенство (8) выполняется, и мы подтвердили гипотезу о соответствии реализаций пожаров биномиальному закону распределения на заданном уровне. Это означает, что выбор гипотезы не противоречит экспериментальным данным.

На Рисунке 2.4 приведены выборочные и теоретические вероятностные характеристики случайной величины «число месяцев с пожарами в году» (Рисунок 2.4 а), 2.4 б)), визуализация плотности распределения  $\chi^2$  при  $\nu = 11$  и координаты расчетного значения критерия (Рисунок 2.4 в)). Аналогичным образом установлено, что пожары на постах ЭЦ, железнодорожных вокзалах, тяговых подстанциях появляются по закону Пуассона.

Таблица 2.4 – Пример проверки для серии тепловозов 2ТЭ116

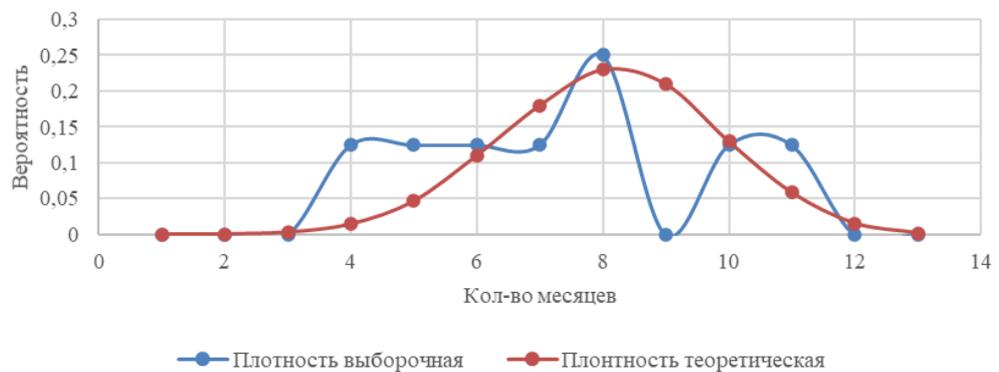
$u_i$	$n_k(\bar{x}_n)$	$p_k$	$np_k$	$(n_k(\bar{x}_n) - np_k)^2$	$\frac{(n_k(\bar{x}_n) - np_k)^2}{np_k}$
0	0	$2,09 \cdot 10^{-5}$	$1,67 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$1,67 \cdot 10^{-4}$
1	0	$3,65 \cdot 10^{-4}$	$2,92 \cdot 10^{-3}$	$8,54 \cdot 10^{-6}$	$2,92 \cdot 10^{-3}$
2	0	$2,92 \cdot 10^{-3}$	$2,34 \cdot 10^{-2}$	$5,46 \cdot 10^{-4}$	$2,34 \cdot 10^{-2}$
3	1	$1,42 \cdot 10^{-2}$	0,11	0,79	6,94
4	1	$4,64 \cdot 10^{-2}$	0,37	0,39	1,07
5	1	0,11	0,86	$1,88 \cdot 10^{-2}$	$2,18 \cdot 10^{-2}$
6	1	0,18	1,46	0,22	0,15
7	2	0,23	1,82	$3,06 \cdot 10^{-2}$	$1,68 \cdot 10^{-2}$
8	0	0,21	1,66	2,75	1,66
9	1	0,13	1,07	$5,22 \cdot 10^{-3}$	$4,87 \cdot 10^{-3}$
10	1	$5,85 \cdot 10^{-2}$	0,47	0,28	0,6
11	0	$1,55 \cdot 10^{-2}$	0,12	$1,53 \cdot 10^{-2}$	0,12
12	0	$1,87 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$2,25 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
	$\sum_{k=1}^i p_k$	1		$\chi_{\nu}^2$	10,62
	0			$\chi_{\alpha,\nu}^2$	19,67

Функция распределения случайной величины "количество месяцев с пожарами в году"



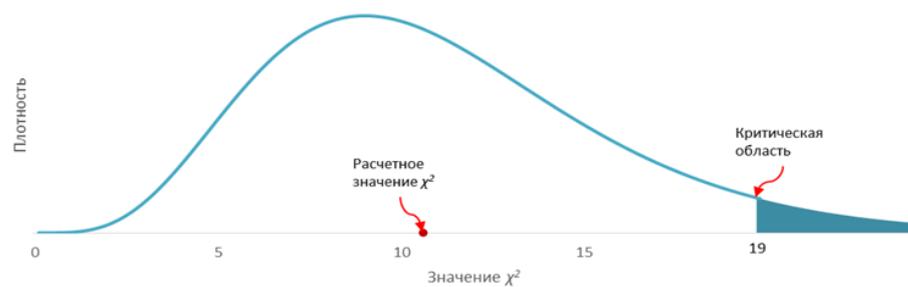
а)

Плотность распределения случайной величины "количество месяцев с пожарами в году"



б)

Распределение  $\chi^2$  (хи-квадрат)



в)

Рисунок 2.4 – Проверка гипотезы о принадлежности биномиальному распределению

а) Выборочная и теоретическая функции распределения

б) Выборочная и теоретическая плотности распределения

в) Критическая область распределения  $\chi^2$  при 11 степенях свободы

### 2.3.1.3 Оценка достаточности объема испытаний

Когда мы имеем дело с редкими событиями, важно определить достаточный объем испытаний, позволяющий проводить проверки простых гипотез. Для этих целей могут быть использованы различные критерии в зависимости от закона распределения случайной величины, методов наблюдения и проверяемой гипотезы. Например, для оценки параметра биномиального распределения необходимо определить минимальное количество объектов, для которых проводятся эксперименты по схеме Бернулли. Отдельной задачей является оценка периода наблюдения за установленным количеством объектов. Эти задачи актуальны и для анализа случайной величины, распределенной по закону Пуассона.

Для каждой серии тепловозов оценивается достаточность объёма испытаний (количество наблюдений) для того, чтобы рассчитанные вероятности обладали определенной надежностью. Покажем это на примере тепловозов серии 2ТЭ116. Данную задачу сформулируем следующим образом: сколько нужно поставить опытов, чтобы определить неизвестный параметр биномиального распределения с ошибкой, не превосходящей заданной величины  $\varepsilon$  [89, 90]. Примем ошибку  $\varepsilon$  на уровне  $0,2p_j^*$  (соответствует высокой точности).

Объем выборки вычисляется по формуле (9):

$$n = \frac{u_\alpha^2}{\varepsilon^2} p_j^* (1 - p_j^*), \quad (9)$$

где  $u_\alpha$  - квантиль стандартного нормального распределения,  $\alpha$  – доверительная вероятность,  $p_j^*$  - параметр биномиального распределения.

Для  $\alpha = 0,9$ ,  $u_\alpha = 1,645$ . Подставив значения в формулу (9), получаем (10):

$$n = \frac{1,645^2}{(0,2 \cdot 0,495)^2} 0,495(1 - 0,495) = 69, \quad (10)$$

Объем испытаний достаточен, так как число месяцев, на основании которых делался вывод о  $p_j^*$ , составлял  $n = 96$ .

### 2.3.1.4 Оценка вероятности возникновения пожара для группы объектов железнодорожного транспорта

Основной вероятностной характеристикой группы объектов ЖДТ является вероятность того, что пожары будут. Вне зависимости от закона распределения случайной величины эту вероятность можно рассчитать по формуле (11):

$$P(B) = 1 - P(k = 0), \quad (11)$$

Оценка вероятности пожара на тепловозах серий 2ТЭ10, 2ТЭ116, ЧМЭЗ, ТЭМ2, как уже говорилось, осуществлялась с использованием биномиального распределения. В этом случае  $P(k = 0)$  – вероятность того, что ни в одном месяце года не будет пожаров, вычисляемая по формуле (12):

$$P(k = 0) = C_k^n p_{\Gamma}^{*k} (1 - p_{\Gamma}^*)^{n-k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} p_{\Gamma}^{*k} (1 - p_{\Gamma}^*)^{n-k} = \quad (12)$$

$$\frac{12!}{0!12!} p_{\Gamma}^{*0} (1 - p_{\Gamma}^*)^{12},$$

где  $p_{\Gamma}^*$  - параметр биномиального распределения с учетом верхних границ, вычисляемый в зависимости от вида статистики. Верхняя доверительная граница отвечает такому параметру биномиального распределения  $p_{\Gamma}^*$ , при котором уже маловероятно получить тот параметр распределения  $p_j^*$  ( $p_j^* = \frac{n_{\text{месяцев с пожарами}}}{n}$ ), который мы получили на опыте, или еще меньший параметр распределения. Это значит, что параметр биномиального распределения наверняка не превышает верхнего значения, а следовательно, мы рассматриваем наилучший вариант.

### 2.3.1.5 Интервальная оценка параметра распределения

Для повышения надежности расчетов целесообразно переходить от точечных оценок к интервальным. Расчет верхних границ параметра биномиального распределения  $p_{\Gamma}^*$  проводился<sup>15</sup> [88] по формуле (13):

$$p_{\Gamma}^* = p_j^* + u_{\alpha} \left( \frac{p_j^*(1-p_j^*)}{n} \right)^{1/2}, \quad (13)$$

где  $u_{\alpha}$  - квантиль стандартного нормального распределения,  $p_j^*$  – параметр биномиального распределения  $j$ -й серии,  $p_j^* = \frac{n_{\text{месяцев с пожарами}}}{n}$ ,  $n$  – число месяцев,

<sup>15</sup> ГОСТ ИСО 11453-2005 Статистические методы. Статистическое представление данных. Проверка гипотез и доверительные интервалы для пропорций

$\alpha$  – доверительная вероятность – вероятность того, что значение  $p^*$  находится в построенном для него интервале.

Для доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$ ,  $u_\alpha = 1,96$ .

Расчет по данной формуле является приближенным и может применяться при достаточно большом объеме выборки. Использование этого расчета фактически связано с «двойным приближением»: закон распределения оценки параметра  $p^*$  заменяют нормальным и вместо точного значения вычисляют приближенное значение. При малых и средних объемах выборки применение формулы (13) может приводить к значительным ошибкам. Поэтому использование данной формулы является первым приближением.

На основе полученной верхней границы параметра распределения и информации об эксплуатационном парке происходил расчет верхней границы вероятности пожара по формуле (12).

### **2.3.1.6 Расчет вероятности пожара на случайно выбранном объекте и ограничений на количество наблюдаемых объектов железнодорожного транспорта**

Как упоминалось в параграфе 2.2.1.3, для того чтобы обеспечить надежность расчетов, необходимо наблюдать за определенным количеством объектов. Вероятность возникновения пожара в году на одном из локомотивов эксплуатационного парка рассчитывалась по теореме умножения вероятностей [90] (события являются независимыми) по формуле (14):

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B), \quad (14)$$

где  $P(A)$  – вероятность случайного выбора конкретного локомотива из эксплуатационного парка,

$P(A) = \frac{1}{N}$ , где  $N$ - эксплуатационный парк в месяц;  $P(B)$  – вероятность того, что в текущем году будут пожары.

В Таблице 2.5 приведены значения эксплуатационного парка основных серий локомотива.

Таблица 2.5 – Эксплуатационный парк различных серий

Серия	Эксплуатационный парк (локомотиво-сутки), N
2ТЭ116	630
2ТЭ10	1041
3ТЭ10	153,75
2М62	237
ТЭП70	338
ЧМЭ3	2332
ТЭМ2	1118
Средний эксплуатационный парк	835

Тогда среднее значение  $P(A) = \frac{1}{N} = \frac{1}{835 \cdot 30} = 3,99 \cdot 10^{-5}$ .

Оценим ограничения эксплуатационного парка. Рассмотрим задачу: какой необходим объем эксплуатационного парка, чтобы определить вероятность  $P(A)$  с ошибкой, не превосходящей данной величины  $\varepsilon$ . Задача решается с помощью уравнения (15) [91]:

$$N = \frac{u_{\alpha}^2 P(A)(1-P(A))}{\varepsilon^2 (30)^2}, \quad (15)$$

Для  $\alpha = 0,9$ ,  $u_{\alpha} = 1,645$ .

Множитель  $1/(30)^2$  добавляется, т.к. рассчитываются локомотиво-сутки. Принимается, что в среднем в месяце 30 дней.

Значение  $\varepsilon$  определим как  $0,35P(A)$ . Так как  $P(A)$  мало, целесообразно устанавливать значение  $\varepsilon$ , пропорционально  $P(A)$ , во избежание случаев получения значений  $N$ , близких к 0. Значение 0,35 как коэффициент пропорциональности определено экспертно. Тогда  $N$  принимает значение

$$N = \frac{1,64^2}{(30)^2 (0,35 \cdot 3,99 \cdot 10^{-5})^2} 3,99 \cdot 10^{-5} (1 - 3,99 \cdot 10^{-5}) \approx 611.$$

Таким образом, минимальным необходимым объемом эксплуатационного парка является значение 611 (локомотиво-сутки).

### 2.3.1.7 Интервальная оценка параметра биномиального распределения при малом объеме выборки

При исследовании статистики пожаров некоторых объектов ЖДТ можно столкнуться с ситуацией, когда количество объектов на всей сети железных дорог

меньше необходимого объема выборки. Ситуация может быть усугублена малым периодом наблюдения. В этом случае могут возникнуть трудности при применении формул оценки верхних границ, основанных на расчёте ширины доверительного интервала. Наиболее характерна такая ситуация для подвижного состава новых серий.

Тепловозы серий 2М62, ТЭП70, 3ТЭ10 характеризовались следующими отличиями от тепловозов серий 2ТЭ10, 2ТЭ116, ЧМЭЗ, ТЭМ2:

1. малый эксплуатационный парк, не превосходящий значения 611 и значительно уступающий по числу другим сериям;
2. малое число пожаров в течение всего наблюдаемого периода.

В связи с этим расчет для тепловозов серий 2М62, ТЭП70, 3ТЭ10 отличался от расчета для тепловозов серий 2ТЭ10, 2ТЭ116, ЧМЭЗ, ТЭМ2. Для демонстрации необходимости другой оценки приведем значения, полученные при расчете по методу, использованном для тепловозов серий 2ТЭ10, 2ТЭ116, ЧМЭЗ, ТЭП70. В Таблице 2.6 представлены значения для исходного параметра биномиального распределения  $p^*$ ,  $\Delta$  - ширина доверительного интервала ( $\Delta = u_\alpha \left( \frac{p_j^*(1-p_j^*)}{n} \right)^{1/2}$ ), и параметр биномиального распределения с учетом верхних границ  $p_\Gamma^*$ , рассчитанный по формуле 13.

Таблица 2.6 – Значения для расчета вероятностей пожаров на тепловозах серий 2М62, ТЭП70, 2ТЭ116, 2ТЭ10

Серия	$p_j^*$	$\Delta$	$p_\Gamma^*$	Эксплуатационный парк
2М62	0,041667	0,05653	0,007535	236,8919
ТЭП70	0,0625	0,06848	0,01748	337,975
2ТЭ116	0,495	0,097	0,592	630
2ТЭ10	0,693	0,089	0,783	1041,3

Как видно из таблицы 2.6, значение величины  $\Delta$  тепловозов серий 2М62 и ТЭП70 сравнимо или превосходит параметр биномиального распределения, тогда как значение  $\Delta$  тепловозов серий 2ТЭ10, 2ТЭ116 значительно уступает параметру

биномиального распределения. Значение  $\Delta$  тепловозов серий 2М62 и ТЭП70, сравнимое с параметром, при расчете параметра биномиального распределения с учетом верхних границ значительно увеличивает его, а при расчете с учетом нижних границ дает отрицательное значение. Кроме того, при малых и средних объемах выборки применение формулы (13), как говорилось ранее, может приводить к значительным ошибкам. В данном случае на выборку оказывает влияние малый эксплуатационный парк.

Поэтому расчет  $p_r^*$  для тепловозов серий 2М62, ТЭП70, 3ТЭ10 для избежание ошибок, связанных с широким доверительным интервалом ( $\Delta \geq p_j^*$ ), осуществлялся с использованием точной оценки [90, 92, 93].

Точное определение доверительных границ происходило по следующим формулам. Параметр биномиального распределения с учетом верхних границ рассчитывался по формуле (16):

$$p_{\text{в}}^* = \frac{m}{nR_2}, \quad (16)$$

где  $m$  – число месяцев с пожарами,  $n$  – число месяцев.

Параметр  $R_2$  рассчитывается по формуле (17):

$$R_2 = \frac{m(2n-m+\frac{1}{2}\chi_\alpha)}{n\chi_\alpha}, \quad (17)$$

где  $\chi_\alpha$  – квантиль распределения хи-квадрат с  $k = 2(m + 1)$  степенями свободы,  $\alpha$  – доверительная вероятность, принимаемая на уровне 0,95.

Параметр биномиального распределения с учетом нижних границ рассчитывался по формуле (18):

$$p_{\text{н}}^* = \frac{m}{nR_1}, \quad (18)$$

где  $m$  – число месяцев с пожарами,  $n$  – число месяцев.

Параметр  $R_1$  рассчитывается по формуле (19):

$$R_1 = \frac{m(2n-m+1+\frac{1}{2}\chi_{1-\alpha})}{n\chi_{1-\alpha}}, \quad (19)$$

где  $\chi_{1-\alpha}$  – квантиль распределения хи-квадрат с  $k = 2m$  степенями свободы,  $\alpha$  – доверительная вероятность, принимаемая на уровне 0,95.

Ввиду малого объема эксплуатационного парка итоговым параметром биномиального распределения для расчета вероятности для тепловозов серий

2М62, ТЭП70, 3ТЭ10 принимался параметр биномиального распределения с учетом нижних границ, рассчитанный по формуле (18). Последующий расчет осуществлялся по аналогии с расчетом для локомотивов серий 2ТЭ10, 2ТЭ116, ЧМЭЗ, ТЭП70 по формулам (4), (14).

### **2.3.1.8 Исследование однородности выборочных совокупностей объектов железнодорожного транспорта**

В параграфах 2.2.1.1 – 2.2.1.6 установлен порядок расчёта вероятности возникновения пожара с учётом таких характеристик, как объем выборки и период наблюдения, приведены результаты расчётов для некоторых серий тягового подвижного состава. Естественным образом возникает вопрос, справедливо ли рассчитанное значение для тепловозов одной и той же серии, но эксплуатируемые в разных частях страны. Например, на Московской железной дороге и Западно-Сибирской железной дороге.

Для того, чтобы ответить на этот вопрос, необходимо проверить однородность выборок: «пожары на локомотивах серии 2ТЭ116 на Московской железной дороге», «пожары на локомотивах серии 2ТЭ116 на Октябрьской железной дороге» и т.п. Очевидно, что нужно проверять однородность 16 выборок (соответствующих 16-и железным дорогам), для упрощения восприятия в дальнейшем будем рассматривать однородность двух выборок. Требуется проверить, есть ли различия между выборками. Существует несколько методов проверки однородности, основные из них: критерий Стьюдента, Критерий Крамера-Уэлча, непараметрические критерии (Смирнова, типа омега-квадрат (Лемана-Розенблатта), Вилкоксона (Манна-Уитни), Ван-дер-Вардена, Сэвиджа, хи-квадрат и др.) [93]. Из-за наличия множества критериев необходимо сделать выбор в пользу одного из них. Согласно работе [94] для выбора одного из нескольких критериев необходимо сравнить их мощности, определяемые видом альтернативных гипотез. Для проверки однородности двух биномиальных выборок традиционно применяют теорему Муавра-Лапласа. Сделать выбор в пользу этого традиционного метода позволяет исследование [94], в котором проанализированы параметрические и непараметрические методы оценки

однородности. Первый вывод, которой сделан в этом исследовании (по отношению к нашему вопросу), касается превосходства непараметрических методов оценки над параметрическими. Второй вывод касается выбора лучшего критерия из непараметрических. Им является критерий типа омега-квадрат. Если программное обеспечение для проведения таких расчётов отсутствует (как в нашем случае), автор рекомендует использовать критерий Смирнова. Он применяется только для непрерывных законов распределения.

Случайное же событие «пожар» распределено по дискретному закону (биномиальный закон для пожаров на тяговом подвижном составе, закон Пуассона для ЭЦ и других объектов, в соответствии с параграфом 2.2.1.2). В таких случаях целесообразно применять для оценки однородности биномиальных выборок теорему Муавра-Лапласа, для иных дискретных распределений предпочтительно вследствие очевидной простоты расчетов применять критерий Хи-квадрат. Этот выбор поддерживается исследованием [94], согласно которому на основании результатов анализа мощности рассматриваемых критериев для ряда пар относительно близких конкурирующих гипотез для случая проверки простых гипотез критерии можно упорядочить по мощности следующим образом:

$$\chi^2 \text{ Пирсона (АОГ)} > \Omega^2 \text{ Андерсона} > \text{Дарлинга} > \omega^2 \text{ Мизеса} \geq \text{Колмогорова}$$

В качестве выборок выступают объекты защиты различных региональных дирекций ОАО «РЖД», наблюдаемое событие – «пожар». Рассмотрим результаты оценки однородности для объектов для постов электрической централизации. Для тягового подвижного состава проверка осуществлялась аналогичным образом на основе теоремы Муавра-Лапласа.<sup>16</sup>

Проверка однородности распределения количества пожаров на постах электрической централизации Московской (МСК) и Октябрьской (ОКТ) железных дорог выглядит следующим образом:

$$H_0: p_j(\text{МСК}) = p_j(\text{ОКТ}), j=0, 1, 2, \dots, k.$$

$$\text{Альтернативная гипотеза: } H_1: (p_j(\text{МСК}) - p_j(\text{ОКТ}))^2 > 0.$$

---

<sup>16</sup> Т.к. количество локомотивов по местам дислокации является коммерческой тайной ОАО «РЖД» подробности расчётов в данной работе не приводятся.

Статистика критерия хи-квадрат имеет вид:

$$\chi^2 = n(\text{МСК}) \cdot n(\text{ОКТ}) \sum_{j=1}^k \frac{1}{m_j(\text{МСК}) + m_j(\text{ОКТ})} \left( \frac{m_j(\text{МСК})}{n(\text{МСК})} - \frac{m_j(\text{ОКТ})}{n(\text{ОКТ})} \right)^2,$$

где  $m_j(\text{МСК})$ ,  $m_j(\text{ОКТ})$  – количество постов ЭЦ на МСК и ОКТ железных дорогах (ЖД) соответственно;

$j=0, 1, 2, \dots, k$  – количество пожаров;

$m_j(\text{МСК})$  – количество раз, когда  $j$  принимало конкретное значение в процессе испытаний. Число испытаний – 4 (4 года) выбрано, т.к. переоснащение (т.е. существенное изменение условий эксплуатации) осуществляется в среднем раз в 5 лет.

В Таблице 2.7 приведены результаты расчётов и выводы о принятой гипотезе при сравнении однородности распределения между ОКТ железной дорогой и другими железными дорогами ОАО «РЖД» (всего 16 ЖД). При  $\chi^2(\alpha; k - 1) = \chi^2(0,1; 4) = 7,77$ . Всего проверено 15 гипотез на однородность показателей каждой из 15 ЖД с 16-й Октябрьской ЖД.

Аналогичным образом были сделаны проверки для других объектов защиты (тяговые подстанции, информационно-вычислительные центры, тяговый подвижной состав, железнодорожные вокзалы). В частности, вопреки ожиданиям, была установлена неоднородность законов появления случайной величины для серий тепловозов 2ТЭ10 и 3ТЭ10. Анализ условий эксплуатации показал значительную разницу в массе поездов, а также скоростях движения. Таким образом, в параграфе 2.2 сформулированы инструменты апостериорной оценки вероятности появления пожара, установлены требования к исходным данным и последовательность обработки статистики пожаров.

### 2.3.2 Апостериорная оценка риска с помощью матрицы рисков

Уровень риска отражает масштаб риска, который характеризуется определенным сочетанием последствий и вероятности их возникновения<sup>17</sup>. Для оценки уровня риска с учетом двух указанных факторов существует инструмент – матрица риска, которая сочетает в себе частоту (вероятность) появления

<sup>17</sup> ГОСТ 33433-2015 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте».

нежелательных событий и их последствия. Матрица последствий и вероятностей является средством объединения качественных или смешанных оценок последствий и вероятностей и применяется для определения или ранжирования уровня риска<sup>18</sup>. Матрица рисков имеет набор основных параметров, таких, как количество категорий рисков, количество интервалов значений вероятностей (частот) и последствий [78, 79, 95]. Таким образом, для определения допустимых значений пожарного риска необходимо построить матрицу рисков. В работе [79] предложен метод построения матрицы рисков, основанный на переходе к логарифмической шкале координат.

---

<sup>18</sup> ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска

Таблица 2.7 – Результат проверки однородности выборок для оценки вероятности пожаров на постах ЭЦ.

$j$ , количество пожаров Дорога	$m_j$					Хи-квадрат ( $m_j$ (ОКТ); $m_j$ (дорога))	$\chi^2(0,1; 4)$	принятая гипотеза
	1	2	3	4	5			
Октябрьская ЖД	Распределение Пуассона $\lambda=2,25$ пожаров/год							
Восточно-сибирская ХЖ	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0	0	1,65	7,77	$H_0$
Горьковская ЖД	$9,5 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0	0	1,78		$H_0$
Дальневосточная ЖД	$3 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0	0	2,31		$H_0$
Забайкальская ЖД	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	0	0	3,76		$H_0$
Западно-Сибирская ЖД	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0	0	1,79		$H_0$
Куйбышевская ЖД	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0	0	2,88		$H_0$
Калининградская ЖД	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0	0	0,26		$H_0$
Красноярская ЖД	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0	0	4,37		$H_0$
Московская ЖД	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0	$4,6 \cdot 10^{-6}$	2,97		$H_0$
Приволжская ЖД	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0	0	1,65		$H_0$
Свердловская ЖД	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0	0	2,12		$H_0$
Северная ЖД	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0	0	2,91		$H_0$
Северо-Кавказская ЖД	$4,4 \cdot 10^{-7}$	$4,4 \cdot 10^{-7}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0	0	1,47		$H_0$
Юго-Восточная ЖД	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0	0	5,10		$H_0$
Южно-Уральская ЖД	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0	0	3,31	$H_0$	

Основной особенностью этого метода является то, что обе оси матрицы рисков являются шкалами наименования (номинальными шкалами). Использование такого метода для построения матрицы рисков для ряда объектов железнодорожного транспорта (например, тягового подвижного состава) сопряжено с рядом трудностей, в основном связанных с построением шкалы последствий [96]. Подвижной состав делится на ряд объектов по признаку серии. Тяговый подвижной состав различных серий отличается по ряду параметров: эксплуатационный парк, конструкция, периодичность ремонтов. При этом единого метода учета стоимости последствий от пожара в настоящее время не существует. Последнее обстоятельство создает трудности в оценке последствий от пожара в денежном эквиваленте. Однако существуют альтернативные способы оценки ресурсов, затрачиваемых из-за последствий пожаров.

Более полезным, с точки зрения обеспечения информативности результатов анализа рисков и перехода от управления рисками к управлению ресурсами, является оценка последствия от пожара с точки зрения необходимого объема восстановления работ. При этом классификация объемов восстановительных работ, в соответствии с технологическими картами следующая [96]:

1. в объеме текущего обслуживания № 2 (ТО-2) и менее;
2. в объеме текущего обслуживания № 2 ТО-3;
3. в объеме текущего ремонта № 1 (ТР-1);
4. в объеме текущего ремонта № 2 (ТР-2);
5. в объеме текущего ремонта № 3 (ТР-3);
6. в объеме среднего ремонта (СР);
7. в объеме капитального ремонта (КР).

Объем восстановительных работ является лингвистической переменной  $\langle N, T, U, G, M \rangle$ , где:

$N$  – название лингвистической переменной;  $T$  – базовое терм-множество лингвистической переменной;  $U$  – универсальное множество переменных;  $G$  – правило, порождающее термы множества  $T$ ;  $M$  – правило, ставящее в соответствие каждой нечёткой переменной нечёткое подмножество множества  $T$ .

Опишем процесс построения лингвистической переменной:

Шаг 1. Определение названия лингвистическое переменной. Название переменной должно совпадать с названием последствий. Для рассматриваемого примера  $N$  = объем восстановительных работ.

Шаг 2. Описание базового терм-множества лингвистической переменной. В соответствии с ГОСТ 33433 - 2015  $T_{\text{объем восстановительных работ}} = \{\text{«незначительный»}; \text{«несущественный»}; \text{«существенный»}; \text{«критический»}\}$ .

Шаг 3. Задание универсального множества переменных. Для обеспечения возможности использования оценки последствия для построения матрицы рисков переменные должны быть такими, чтобы их можно было расположить на номинальной шкале. В качестве такой характеристики выбрана трудоемкость выполнения определенных видов ремонта.

Шаг 4. Определение правила, порождающего термы множества  $T$ . Процедурой, описывающей процесс генерирования из  $T$  значений, является метод, предложенный в статье [79].

Шаг 5. Определение правила, ставящего в соответствие каждой нечёткой переменной подмножества  $U$  терму множества  $T$ . Подробнее опишем множество  $U$  – универсальное множество переменных. Подмножества  $u_i$  множества  $U$  являются трудозатраты на выполнение ремонтных работ для различных серий тепловоза.  $u_i$  являются частично-упорядоченными множествами, примеры для некоторых серий тепловозов [97, 98] приведены в Таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Нормативы трудоемкости единицы ремонта

Серия локомотива	Вид технического обслуживания и текущего ремонта (трудоемкость ремонта секции/тепловоза, чел. час)					
	ТО-3	ТР-1	ТР-2	ТР-3	СР	КР
ТЭП70	112,88	248,07	1453,18	2991,58	15067	18081
2ТЭ116	100,74	230,89	1375,52	2681,14	9898	13496
ТЭМ7	86,94	229,31	1285,07	2563,84	5871	7114
2ТЭ10У	84,34	215,88	1260,52	2494,14	4713	5665
2ТЭ10М	84,34	215,88	1260,52	2494,14	4675	5618
2ТЭ10В	84,34	215,88	1260,52	2494,14	4531	5445

Процедура  $G$ , описывающая правила присвоения каждому интервалу последствий числовой эквивалент, соответствующую ему лингвистическую переменную из  $T$  и определить объемы ремонта. На Рисунке 2.5 показан алгоритм реализации правила  $G$  (построен по методологии, изложенной в статье [79]). В Таблице 2.9 приведены результаты применения правила  $G$  при оценке тепловозов серий 2ТЭ116, 2ТЭ10У, ТЭП10.

Таблица 2.9 – Характеристики терм-множеств

Параметры		2ТЭ116	2ТЭ10У	ТЭП10
Относительный диапазон изменения вероятностей		24	24	24
Относительный диапазон изменения последствий		296,94	167,64	400,43
Относительный шаг шкалы частот		5	5	5
Относительный шаг шкалы последствий		10	7	10
Незначительный объем работ	Вид ремонта	<b>ТО-2; ТО-3</b>		
	Трудоемкость работ	Менее 197,96	Менее 197,96	Менее 227
Несущественный объем работ	Вид ремонта	<b>ТР-1</b>		
	Трудоемкость работ	От 197,96 До 910,62	От 197,94 До 716,37	От 227 До 1339,45
Существенный объем работ	Вид ремонта	<b>ТР-2; ТР-3</b>		
	Трудоемкость работ	От 910,62 До 4355,12	От 716,37 До 2545,02	От 1339,45 До 7996,53
Критический объем работ	Вид ремонта	<b>СР; КР</b>		
	Трудоемкость работ	Более 4355,12	Более 2545,02	Более 7996,53

Примечание к Таблице 2.9: относительные шаги шкал частот и последствий зависят от наблюдаемых минимальных и максимальных значений. Соотношение между минимальными и максимальными последствиями для локомотивов серии 2ТЭ10У существенно отличается от аналогичных отношений для серий 2ТЭ116 и ТЭП10. Это приводит к необходимости использования различных относительных шагов по шкале последствий в случае, если последствия оцениваются по трудоемкости и, соответственно, нескольких матриц рисков. Целью же является построить такую матрицу рисков, на которую можно нанести координаты рисков всех тепловозов (и аналогично для электровозов). Как видно из таблицы 2.9, для различных серий тепловозов различным термам соответствуют одни и те же виды ремонта.

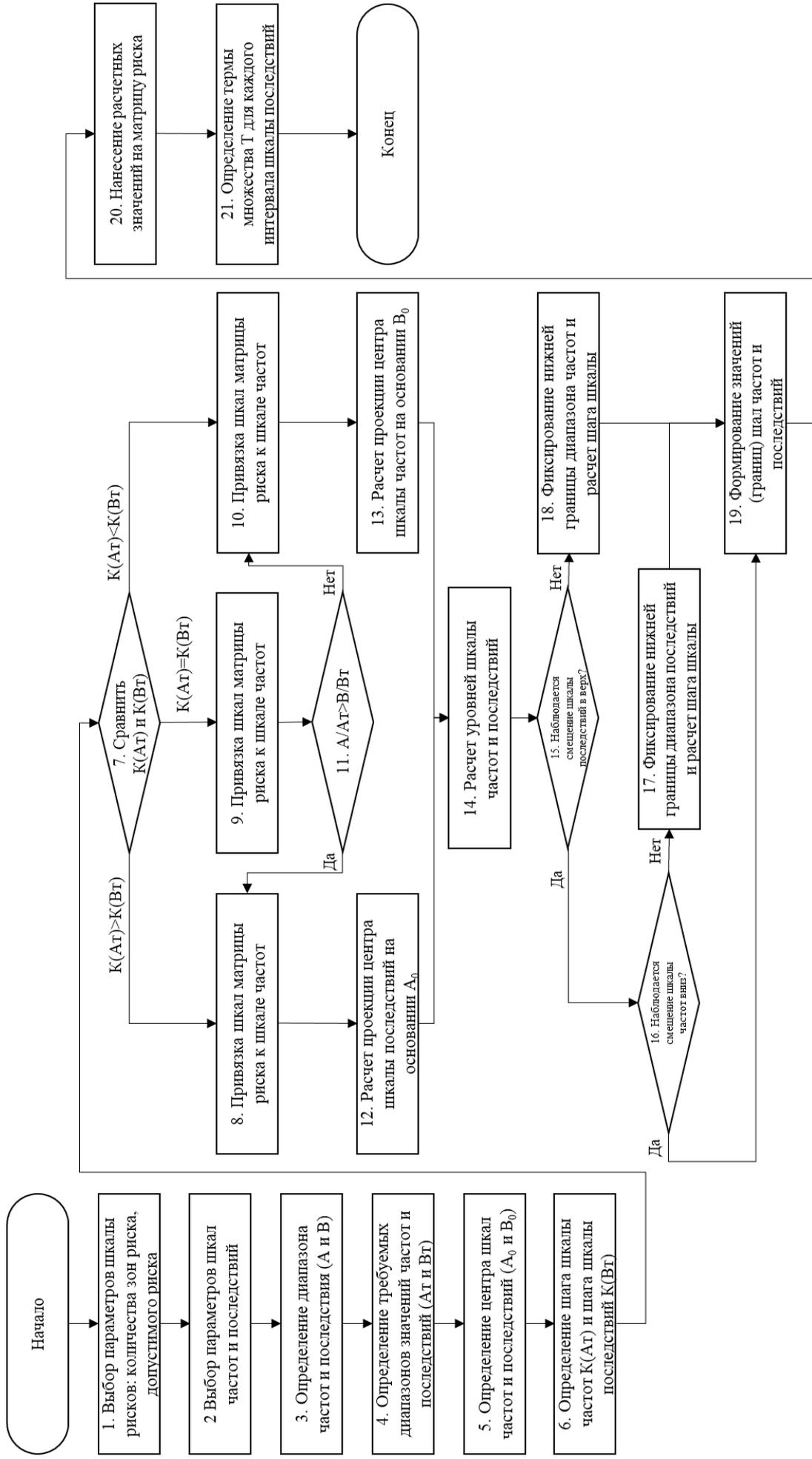


Рисунок 2.5 – Алгоритм реализации правила, порождающего терми T

Таким образом, ширина интервалов последствий в единицах измерения номинальной шкалы различна, но в единицах измерения лингвистических переменных стабильна. Демонстрация описанного явления приведена на Рисунке 2.6. На основании принципов, приведенных в работе [79], построены матрицы рисков тепловозов и электровозов.

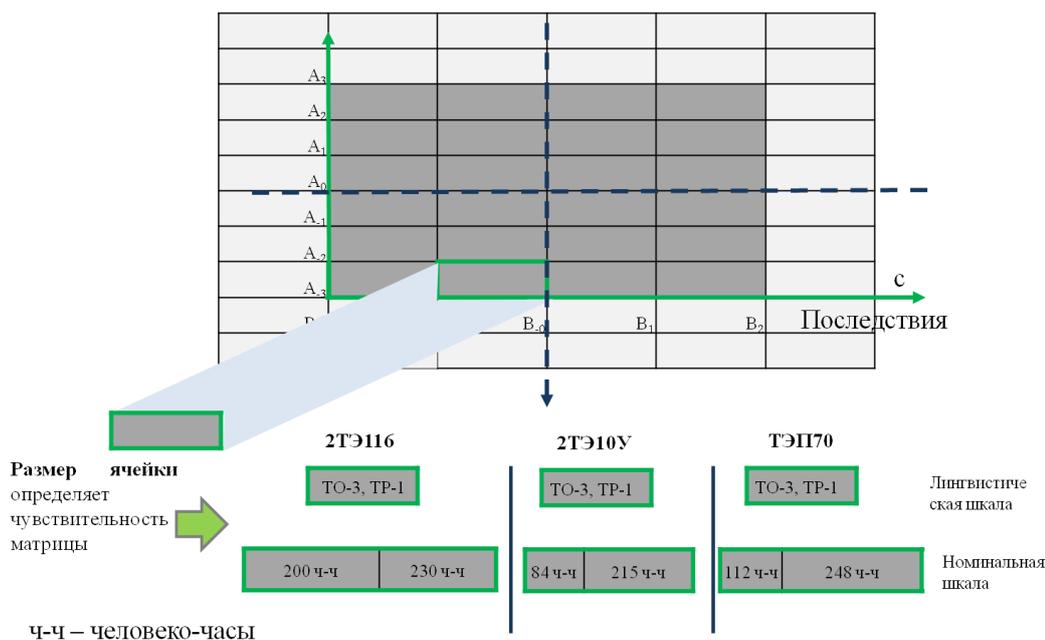


Рисунок 2.6 – Сравнение ячеек на лингвистической и номинальной шкалах

Описание последствий пожаров с помощью терм-множеств позволило сформировать итоговую матрицу пожарных рисков тепловозов (Рисунок 2.7) и итоговую матрицу пожарных рисков электровозов (не приводится). Формулы, необходимые для построения матрицы рисков, приведены в статье [79] и в данной работе не повторяются.

Рассмотрим вопрос выбора шкалы для использования в матрице рисков. В случае использования номинальной шкалы возникает необходимость использования отдельной матрицы рисков для каждой серии тепловозов. При этом одним из результатов оценки риска будет являться вывод о виде ремонта, необходимого локомотиву после пожара. Таким образом, оцениваемая трудоемкость ремонта является промежуточным результатом анализа. И, поскольку категории тяжести последствий для различных серий локомотива

характеризуются одними и теми же видами ремонта, то рационально на матрице риска (построенной с помощью номинальной шкалы) использовать лингвистическую шкалу. Такой подход обеспечит возможность использовать единую матрицу для всех серий тепловозов.

Пожароопасность состояний	Вероятность пожара	УРОВЕНЬ РИСКА			
		Допустимый	Нежелательный	Недопустимый	Недопустимый
Опасно	$1,6 \cdot 10^{-4} \leq P$	Допустимый	Нежелательный	Недопустимый	Недопустимый
Условно опасно	$8,7 \cdot 10^{-5} \leq P < 1,6 \cdot 10^{-4}$	Допустимый	Нежелательный	Нежелательный	Недопустимый
Возможно опасно	$4,6 \cdot 10^{-4} \leq P < 8,7 \cdot 10^{-5}$	Допустимый	Допустимый	Нежелательный	Недопустимый
Малоопасно	$2,4 \cdot 10^{-5} \leq P < 4,6 \cdot 10^{-5}$	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Нежелательный	Нежелательный
Условно не опасно	$1,3 \cdot 10^{-5} \leq P < 2,4 \cdot 10^{-5}$	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Допустимый	Нежелательный
Не опасно	$P < 1,3 \cdot 10^{-5}$	Не принимаемый в расчет	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Нежелательный
Затрат рабочей силы на секцию, чел-ч		ТО-2; ТО-3	ТР-1	ТР-2; ТР-3	СР; КР
2ТЭ116		Менее 197,96	От 197,96 До 910,62	От 910,62 До 4355,12	Более 4355,12
2ТЭ10У		Менее 197,94	От 197,96 До 716,37	От 716,37 До 2545,02	Более 2545,02
ТЭП70		Менее 227	От 227 До 1339,45	От 1339,45 До 7996,53	Более 7996,53

Рисунок 2.7– Итоговая матрица рисков для тягового подвижного состава

На Рисунке 2.7 приведен результат построения матрицы рисков для тепловозов [96]. Шкала частот построена в соответствии с алгоритмом, изложенном в работе [79] на основании исследований, проведенных в параграфе 2.2. Аналогичным образом построены матрицы пожарных рисков постов ЭЦ, информационно-вычислительных центров (ИВЦ) ОАО «РЖД», железнодорожных вокзалов, тяговых подстанций.

Результатами апостериорной оценки пожарных рисков является перечень объектов железнодорожного транспорта, для которых необходимо повышение эффективности управления состояниями пожарной безопасности, т.к. классических мероприятий недостаточно, чтобы обеспечить допустимый уровень риска.

## **2.4 Априорная оценка пожарного риска на стационарных и передвижных объектах железнодорожного транспорта на основе результатов диагностики**

В соответствии с разработанной в параграфе 2.2 концепцией оценки рисков на стационарных и передвижных объектах железнодорожного транспорта по результатам апостериорной оценки пожарных рисков объектов железнодорожного транспорта должны быть разработаны критерии оценки объектов и осуществлен прогноз вероятности появления пожароопасной ситуации. Данный параграф посвящен разработке метода математического моделирования пожарных рисков объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ на стадии эксплуатации, в т.ч. метода оценки априорной вероятности пожарного риска на основании фактического состояния объекта и прогнозирования пожарного риска.

### **2.4.1 Априорная оценка вероятности появления пожара и пожароопасных состояний на стационарных и передвижных объектах железнодорожного транспорта**

#### **2.4.1.1 Метод определения вероятности перехода объекта в опасные состояния из выявленного неопасного состояния на основе марковского топологического метода**

Множества состояний объекта описаны в параграфе 2.1. Объект имеет конечное множество состояний. При этом ни одно из неопасных состояний не является поглощающим. Времена пребывания системы в отдельных состояниях множества могут быть как случайными, так и константами. Изменение уровня пожарного риска происходит из-за перехода процесса из состояния  $s_i$  в состояние  $s_j$  с вероятностью  $p_{ij}$  и соответствует модели вложенной Марковской цепи. Следовательно, развитие пожароопасной ситуации может быть описано марковским процессом [82].

Для эффективного управления пожарной безопасностью необходимо определять вероятности перехода из заданного начального неопасного состояния в

опасные. Это позволит планировать мероприятия для предотвращения развития наиболее вероятных путей появления пожароопасных состояний.

Очевидно, что если у графа только одно опасное состояние, то вероятность перехода в него будет равна 1 (как для эргодического графа, так и для графа с поглощающим опасным состоянием). Рассмотрим другой пример. Пусть начальным состоянием объекта (граф состояний на Рисунок 2.2) является состояние 2, смежное только с одним опасным состоянием 4, путей перехода из этого начального состояния в другое опасное нет. В этом случае вероятность перехода в опасное состояние, смежное с начальным, равна 1, а в другое опасное состояние – 0. Известная задача поиска значения стационарных вероятностей объекта отличается от решаемой задачи поиска вероятности перехода в состояние из заданного начального. Для рассматриваемого примера будут отличные от 0 вероятности пребывания объекта в состояниях 2 и 4 (для остальных состояний – 0), вероятность перехода в опасное состояние 4 равна 1, а в опасное состояние 5 равна 0.

У графов с несколькими опасными состояниями вероятность перехода объекта из заданного начального неопасного состояния в конкретное опасное состояние зависит от:

1. наличия путей перехода в опасное состояние;
2. значений переходных вероятностей на прямых путях в опасное состояние;
3. количества прямых путей перехода в опасное состояние (на которых не лежит другое опасное состояние).

Сумма вероятностей перехода из заданного неопасного состояния в опасные состояния, зависящих от трех вышеприведенных факторов, равна 1.

Формализуем вышеприведенные рассуждения. В случайный момент времени (например, на момент проведения пожарной проверки) объект ЖДТ может находиться в любом состоянии из множеств неопасных состояний  $S_H$  и дестабилизирующих состояний  $S_{\text{риск}}$ . Задача состоит в определении вероятности перехода системы из конкретного неопасного состояния в любое опасное. На

основании проведенных расчётов должны приниматься решения об изменении значений переходных вероятностей за счёт внедрения систем противопожарной защиты, проведения предупредительных ремонтов и других организационно-технических мероприятий.

**Утверждение.** Вероятность перехода системы из конкретного  $i$ -го начального неопасного состояния ( $i \in S_{\text{ПБ}}, S_{\text{ПБ}} \cap \bar{S}_{\text{ПБ}} \neq \emptyset, S_{\text{ПБ}} \cup \bar{S}_{\text{ПБ}} = S$ ) в любое опасное состояние  $f \in \bar{S}_{\text{ПБ}}$  определяется выражением:

$$b_{if} = \frac{\sum_{f \in \bar{S}_{\text{ПБ}}} \sum_k l_k^{if} \Delta G_k^f}{\Delta G_{\bar{S}_{\text{ПБ}}}}, \quad (20)$$

где  $l_k^{if}$  -  $k$ -й путь, ведущий из неопасного состояния графа  $i \in S_{\text{И}}$  в опасное состояние  $f$ ;

$\Delta G_k^f$  – вес разложения графа без  $i$ -й вершины и вершин графа, расположенных на  $k$ -м пути;

$\Delta G_{\bar{S}_{\text{ПБ}}}$  - вес разложения графа без вершин множества опасных состояний.

Докажем справедливость выражения (20). Случайный переход системы из  $i$ -го исходного неопасного состояния в любое опасное состояние возможен следующим образом:

— путем предварительных переходов в смежные неопасные состояния. Описывается суммой произведений вероятностей переходов из исходного неопасного состояния в другие неопасные состояния на вероятности переходов системы из этих неопасных состояний в любое опасное состояние, т.е. эта вероятность равна:  $\sum_j p_{ij} \cdot b_{jf}$ . В матричной форме записи:  $P \cdot B$ , где  $P$  – это матрица переходных вероятностей размерности  $n \times n$ , а  $n$  – количество вершин в множестве неопасных состояний;  $B$  – вектор столбец вероятностей переходов в опасные состояния размерности  $(1 \times n)$ ;

— непосредственный переход за один шаг в любое опасное состояние описывается вектором – столбцом вероятностей одношаговых переходов системы из  $i$ -го состояния в любое опасное состояние  $f$ :  $P = (p_{if})$ . Данный вектор – столбец имеет размерность  $(n \times 1)$ , где  $n$  – число вершин в множестве неопасных состояний.

Таким образом, вероятность случайного перехода системы из исходного  $i$ -го неопасного состояния в любое опасное состояние  $f$  может быть выражена следующим матричным уравнением:

$$B=PB+P, \quad (21)$$

В этом уравнении неизвестными являются элементы вектора-столбца  $B$ . После их группировки в левой части матричного уравнения получим:

$$B(I-P)=P, \quad (22)$$

где правая часть уравнения – вектор-столбец свободных членов вероятностей переходов за один шаг из вершин  $i, j, \dots, z, \in S_{\text{ПБ}}$  в вершину  $f \in \bar{S}_{\text{ПБ}}$ .

Затем по правилу Крамера находим  $B_i = \Delta_i/\Delta$ , где определитель графа в множестве неопасных состояний  $\Delta = |I - \Pi|$ , а  $\Delta_i$  – определитель, получающийся заменой  $i$ -го столбца в матрице  $I - \Pi$  на вектор свободных членов  $P$  при условии, что  $\Delta_i$  и  $\Delta$  не равны 0.

Определитель  $\Delta_i$  отличается от определителя  $\Delta$  тем, что в столбце  $i$  элемент  $p_{ij}$  заменяют на элемент  $p_{if}$ . Согласно работе [81] воспользуемся графовой формой представления определителя и миноров, а также путей на графе, т.е.:

$$\Delta = \Delta G_{\bar{S}_{\text{ПБ}}}, \quad \Delta_i = \sum_{f \in \bar{S}_{\text{ПБ}}} \sum_k l_k^{if} \Delta G_k^f, \quad (23)$$

где  $\Delta G_{\bar{S}_{\text{ПБ}}}$  – вес разложения графа без множества опасных вершин;

$\Delta G_k^f$  – вес разложения графа без опасных вершин и вершин, находящихся на  $k$ -м пути;

$l_k^{if}$  – вес  $k$ -го пути из неопасной вершины  $i$  в опасную вершину  $f$ .

Подставляя формулы (23) в формулу (22), находим, что:

$$b_{if} = \frac{\sum_{f \in \bar{S}_{\text{ПБ}}} \sum_k l_k^{if} \Delta G_k^f}{\Delta G_{\bar{S}_{\text{ПБ}}}}.$$

Предложенный метод позволяет устанавливать численное значение вероятности попадания объекта железнодорожного транспорта в пожароопасное состояние из состояния, выявленного по результатам аудита [83]. Предложенное решение позволяет проводить оценки вероятностей перехода в опасные состояния для неэргодических графов и графов с поглощающими опасными состояниями.

Априорная вероятность перехода в пожароопасное состояние (в т.ч. пожара) является индивидуальной характеристикой оценок объекта, а не свойством группы, как в случае с апостериорной оценкой. Критерием принятия решения о необходимости проведения корректирующих мероприятий является уровень вероятности возникновения пожара. В зависимости от количества устраненных пожароопасных состояний определяется новый уровень вероятности.

Например, рассмотрим вероятность перехода из состояния 0 «Кабели/провода не повреждены» графа рисунка 2.2 в пожароопасное состояние 4 «Нагрев кабелей». Существуют 2 пути перехода в опасное состояние, Рисунок 2.8.

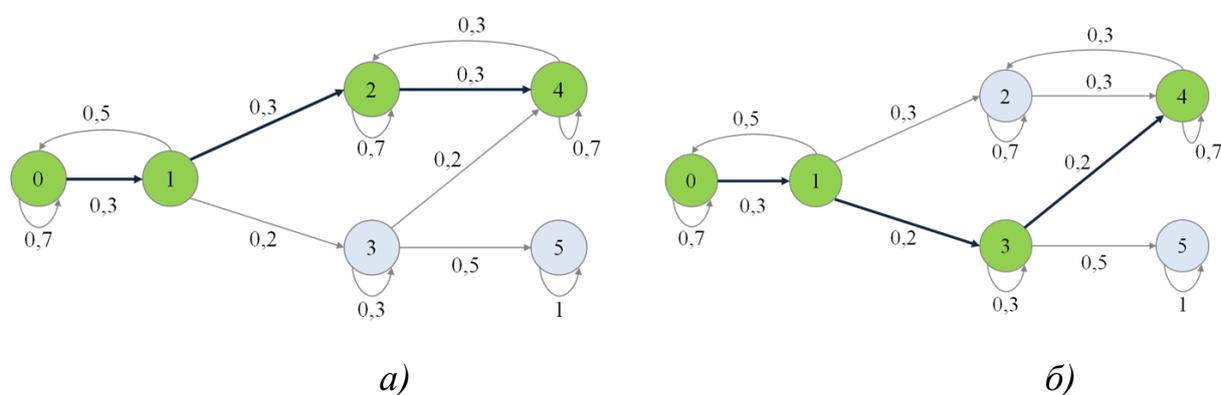


Рисунок 2.8 – Пути перехода в опасное состояние  $S_4$

а) Путь № 1 к опасному состоянию 4

б) Путь № 2 к опасному состоянию 4

На основе анализа результатов зависимости прогнозов вероятности появления пожара по формуле (20) из-за нарушений требований пожарной безопасности (вероятность/частоту нарушений характеризуют переходные вероятности) планируется периодичность планового технического обслуживания технических средств, являющихся потенциальными источниками огня. Пример расчета вероятности перехода из состояния «Кабели/провода не повреждены» в состояние «Нагрев кабелей»:

$$b_{04} = \frac{\sum_{f \in \bar{S}_{ПБ}} \sum_k l_k^{if} \cdot \Delta G_f^k}{\Delta G_{\bar{S}_{ПБ}}} = \frac{0,027 \cdot 0,7 + 0,012 \cdot 0,3}{0,0315} = \frac{0,0225}{0,0315} = 0,71.$$

На Рисунке 2.9 приведены графики зависимости вероятности появления пожароопасного состояния «нагрев кабелей»  $b_{04}$  в зависимости от вероятности появления нарушений ТПБ. Как видно из рисунка 2.9, существенное влияние на вероятность появления пожароопасного состояния оказывает изменение вероятности перехода из состояния 1 «Открыто проложенные кабели/провода (без защитных оболочек/труб/коробов) в местах, где возможны механические повреждения» в состояние 0 «Провода и кабели не повреждены». Таким образом, эффективным инструментом управления пожарной безопасностью в этом случае является организационный контроль состояния кабеля и прокладка кабелей в тех местах, где минимизировано механическое воздействие.

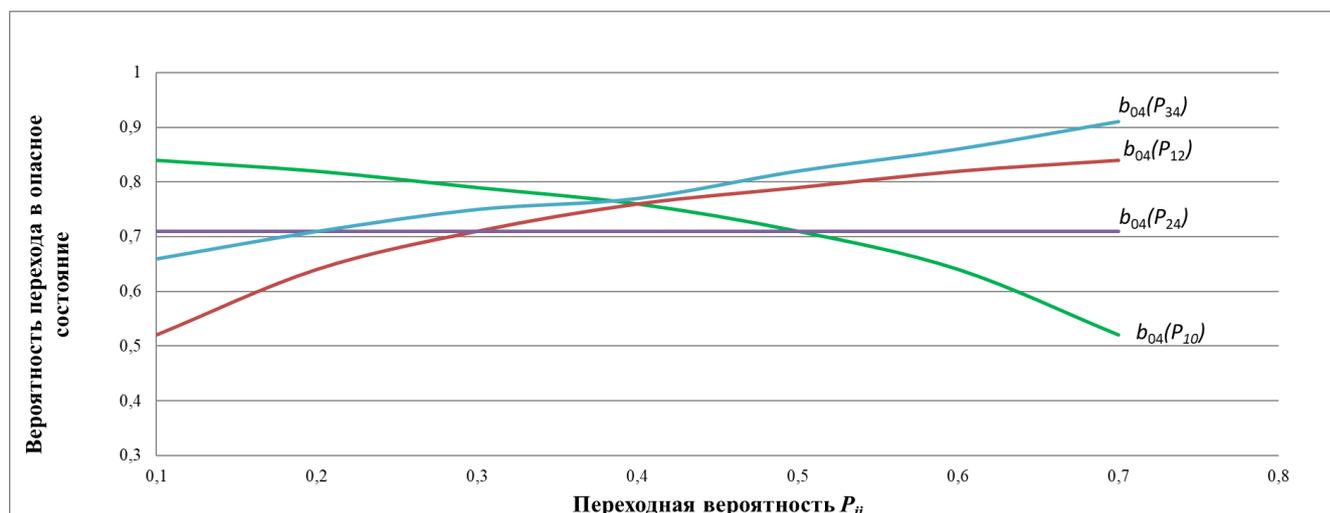


Рисунок 2.9 – Вероятность появления пожароопасного состояния

Примеры построения графов состояний и оценки вероятности появления опасного пожароопасного события на объектах тяговых подстанциях приведены в Приложении А.

Значение переходных вероятностей определяется на основе статистики или экспертных оценок в случае отсутствия статистики. В ОАО «РЖД» была сформирована экспертная комиссия, и определены три категории опасности состояний. К 1-й категории опасности относятся состояния, которые становились причинами пожара, ко 2-й – состояния, которые приводили к появлению причины

пожара, или состояния объектов, которые по статистике были источниками огня. К третьей категории опасности относятся прочие состояния.

Переходные вероятности для состояний одной категории одинаковы. Чем опаснее состояние, тем больше значение переходной вероятности перехода в опасное состояние (или в состояние, предшествующее опасному). Таким образом экспертам необходимо:

- определить категорию каждого состояния;
- определить значения переходных вероятностей для каждой категории в следующее наиболее вероятное состояние;
- определить для каждого состояния следующее наиболее вероятное, если их несколько (например, на Рисунке 2.8 у состояния 1 два следующих состояний, состояние 2 является более вероятным);
- определить значения переходных вероятностей для оставшихся состояний.

Процедура определения категорий состояний включает в себя:

- анкетирование экспертов на предмет присвоения категории для каждого состояния [99];
- формирование сводной таблицы с мнением экспертов о категориях пожароопасных состояний [99, 100];
- пересчёт рангов с учётом связанных рангов и количеством состояний;
- расчёт коэффициента конкордации для оценки согласованности мнений экспертов [101];
- вывод о согласованности мнений экспертов;
- определение перечня состояний, относящихся к каждой категории.

Пример реализации указанной процедуры с приведен в разделе А.3 Приложения А.

### 2.4.1.2 Априорная оценка вероятности появления пожароопасного состояния для систем, пожары в которых происходят из-за накопления неисправностей

В случае, когда систему невозможно представить Марковским или полумарковским процессом, например, потому что развитие системы обусловлено накоплением состояний, то необходимо применение других методов оценки. Для таких систем (для ряда пожароопасных объектов ОАО «РЖД») характерен именно этот фактор – возникновение пожара из-за накопления определенных неисправностей (состояний). Как правило, эти накопления происходят по причине нарушений регламентов проведения технического обслуживания, технического содержания, ремонтов (далее ТО/ТР). Введём следующие допущения модели:

1. при определенном количестве неисправностей на объекте достоверно произойдет пожар (однако время от появления неисправностей до возникновения пожара неизвестно, поэтому в дальнейшем будем использовать термин «пожароопасное состояние»), т.е.  $\sum p_i = 1$ , где  $p_i$  – вероятность перехода в пожароопасное состояние из-за  $i$ -го состояния.

2. вероятность появления  $i$ -го пожароопасного состояния зависит от вида ТО/ТР, на котором оно должно быть компенсировано. Точнее, от количества пожаров, произошедших вследствие неправильного проведения ТО/ТР определенного вида.

3. предполагается линейная зависимость между значением  $p_i$  и следующими факторами:

— общее количество  $i$ -х пожароопасных состояний  $N$ , которое можно устранить на одном виде ТО/ТР,

— опасностью некачественного ТО/ТР.

Вероятность пожара  $p_i$  находится в прямой зависимости от  $m_i$  – доли влияния вида ТО/ТР на опасное состояние и в обратной зависимости от  $N$  [102]. При этом  $\sum_{i=1}^n m_i = 1$ .

Значения  $N$ ,  $m_i$  определяют эксперты<sup>19</sup>, компетентные в устройстве объекта защиты [9]. Для каждого объекта устанавливается перечень пожароопасных состояний. Причем необходимо соблюдать правило: наличие всех пожароопасных состояний однозначно приведет к пожару. Для каждого  $i$ -го состояния объекта вероятность  $p_i$  рассчитывается:

$$p_i = \frac{1}{N} \cdot m_i, \quad (24)$$

где,  $N$  – общее количество  $i$ -х пожароопасных состояний, которые возможно предотвратить одним и тем же видом ТО/ТР;

$m_i$  – доля влияния  $i$ -го вида ТО/ТР, компенсирующего данное  $i$ -е пожароопасное состояние.

Расчёт  $m_i$ .

Шаг 1. Расчет  $m_i$  - доли влияния вида ТО/ТР, компенсирующего пожароопасное состояние, проводится на основе ранжирования видов ремонта. Ранги видов ремонта задаются экспертно (аналогично процедуре, описанной в параграфе 2.4.1.1), на основе знаний и опыта членов экспертной группы. После чего методом ранжирования происходит вывод итогового ранга.

Проставление рангов происходит по следующим правилам:

1) Ранги видов ТО/ТР в порядке от высшего к низшему (от 1 и далее): КР → ТР – 3 ≈ СР → ТР – 1 ≈ ТО – 3 → ТР – 2 ≈ ТО – 2.

2) Следующие виды ТО/ТР имеют одинаковый ранг: ТР – 3 и СР, ТР – 1 и ТО – 3, ТР – 2 и ТО – 2.

Далее, для каждого  $j$ -го пожароопасного узла определяется перечень видов ТО/ТР, которые присутствуют по контрольно-оценочной карте (КОК), и проводится повторная ранжировка для выявленных состояния.

Таким образом, перечень ТО/ТР для компенсации пожароопасных состояний по тяговому электродвигателю (ТЭД) включает в себя следующие виды: СР, ТР-3, ТО-2.

---

<sup>19</sup> При привлечении организации работы экспертов должны быть соблюдены соответствующие требования, например, ГОСТа 23554.0-79 и других.

Шаг 2. Ранжирование видов ТО/ТР. Ранжирование проводится на основе итоговых рангов, указанных в Таблице 2.10 по правилам присвоения рангов. В Таблице 2.11 приведен пример ранжировки для рассматриваемой КОК по ТЭД.

Таблица 2.10 – Ранги видов ТО/ТР

Вид ТО/ТР	Ранг, $k_i$
КР	1
ТР-3	2,5
СР	2,5
ТР-1	4,5
ТО-3	4,5
ТР-2	6,5
ТО-2	6,5

Таблица 2.11 – Итоговые ранги видов ТО/ТР для КОК узла ТЭД

Вид ТО/ТР	Итоговый ранг вида ТО/ТР
СР	1,5
ТР-3	1,5
ТО-2	3

Шаг 3. Расчет значений весового коэффициента  $\alpha$ . Расчет весового коэффициента осуществляется по формуле (25), результаты расчета для примера КОК по ТЭД отражены в Таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Расчетное значение весового коэффициента  $\alpha$ 

Порядковый номер ранга, $i$	Вид ТО/ТР	Итоговый ранг вида ТО/ТР, $k_i$	$\alpha_i$	$m_i$
1	СР	1,5	1	0,4
2	ТР-3	1,5	1	0,4
3	ТО-2	3	0,5	0,2

$$\alpha_i = \frac{k_{i-1}}{k_i}, \quad (25)$$

где  $i$  – порядковый номер ранга.

При этом  $\alpha_1$  для каждого узла равно 1.

Шаг 4. Расчет доли влияния вида ТО/ТР, компенсирующих пожароопасное состояние. После проведения необходимых расчетов составляется уравнение для нахождения доли влияния вида ТО/ТР ( $m$ ). Уравнение имеет вид:

$$\sum_{i=1}^n m_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot X = 1, \quad (26)$$

где  $m_i$  - доля влияния вида ТО/ТР, компенсирующего пожароопасное состояние (Таблица 2.12);

$\alpha_i$  - весовые коэффициенты, значение которых определяется по Таблице 2.11;

$i$  – порядковый номер, изменяется от 1 до  $n$ , где  $n$  – последний порядковый номер.

Приведем расчет для рассматриваемого примера:

$$1 \cdot X + 1 \cdot X + 0,5 \cdot X = 1$$

$$X = 0,4$$

Аналогичная операция проводится для остальных типовых узлов. В Таблице 2.13 приведены расчетные значения весов для узлов тепловозов серии 2ТЭ116.

Таблица 2.13 – Расчетные значения весов для пожароопасного узла ТЭД электровоза серии ВЛ80 в/и

Узел	СР	ТР-3	ТР-2	ТР-1	ТО-3	ТО-2
	$m_i$	$m_i$	$m_i$	$m_i$	$m_i$	$m_i$
ТЭД	0,4	0,4				0,2

Далее по формуле 24 осуществляется расчёт  $p_i$  и формируется итоговая КОК, содержащая перечень пожароопасных состояний и соответствующие им вероятности пожара.

#### 2.4.2 Индивидуальная шкала пожарного риска объекта и оценка априорного риска

При оценке априорного риска возникает вопрос в необходимости учёта, помимо вероятности пожара, его последствий. Для однотипных объектов величина последствий пожара будет стремиться к среднестатистическим из-за типового набора оборудования и пожарной нагрузки. Конечно, возможно появление «выбросов», но их появление связано в большей мере с человеческим фактором при тушении пожара, чем с характеристиками объектов защиты. Решающее значение оказывает как транспортная доступность места возгорания (доступность

пожарных поездов, так и для подразделений пожарной охраны), так и выполнение условий, необходимых для начала тушений [9]. Например, при возгорании поста ЭЦ нельзя приступить к тушению пожара, пока задние не будет обесточено, а это зависит от специалистов хозяйства электрификации и электроснабжения.

Среднестатистическая величина последствий пожара уже учтена на этапе априорной оценки и нет смысла повторного её использования. Новой характеристикой объекта ЖДТ является именно априорная вероятность появления пожара. Т.к. она зависит от частоты нарушений требований пожарной безопасности, количества возможных опасных состояний и путей их достижения, то этой оценки достаточно для принятия решения об уровне риска.

В связи с этим возникает необходимость разработки шкалы пожарного риска на основании значения априорной вероятности появления пожара. Критерий допустимого уровня риска зависит от диапазона изменения значений  $b_{if}$  – вероятности перехода в опасное состояние (или  $p_i$ , в случае если вероятность появления пожара определяется на основе экспертных оценок) наличия установленной нормы.

#### **2.4.2.1 Определение диапазона изменения значений априорной вероятности появления пожароопасного состояния или пожара, рассчитанной с помощью графового метода**

В первую очередь необходимо оценить диапазоны изменения значений  $b_{if}$  (вероятность перехода из  $i$ -го неопасного состояния системы в любое опасное, параграф 2.4.1.1). Этот диапазон определяется количеством выделенных для объектов пожароопасных состояний. В случае, если для объекта возможно только одно пожароопасное состояние, то объект рано или поздно в него перейдет и  $b_{if} = 1$ . Если пожароопасных состояний два, как в примере выше, то сумма  $\sum b_{if} = 1$ , и, как показано в примере выше,  $b_{04} = 0,71$  (вероятность перехода в 4-е состояние),  $b_{05} = 0,29$  (вероятность перехода в 5-е состояние). Проведем следующее моделирование: добавим к графу на Рисунке 2.2 сначала одну, потом две дополнительные опасные вершины и посмотрим, как изменятся значения  $b_{if}$ . При

этом будем менять только те переходные вероятности, которые связаны с переходом из предопасных состояний в опасные. Не будем менять значимость переходной вероятности. Например, при добавлении 6-й вершины  $p_{35} = 0,2$  (ранее 0,5), а  $p_{35} = 0,3$ . Результаты этого моделирования проведены в Таблице 2.14 и на Рисунке 2.10.

Таблица 2.14 – Исследование диапазона изменения значений вероятности при добавлении вершин

Кол-во опасных состояний	Вероятность	Номер состояний, $f$				$\sum b_{if}$
		4	5	6	7	
1	$b_{0f}$	1	x	x	x	1
2	$b_{0f}$	0,71	0,29	x	x	1
3	$b_{0f}$	0,71	0,12	0,17	x	1
4	$b_{0f}$	0,52	0,11	0,17	0,2	1

Рассмотрим другую ситуацию, когда вероятность перехода в добавленную вершину 5 на несколько порядков меньше, чем в вершину 4  $p_{34}=0,49999$  (ранее 0,5), а  $p_{35}=1 \cdot 10^{-5}$ . Полученные результаты приведены в Таблице 2.15.

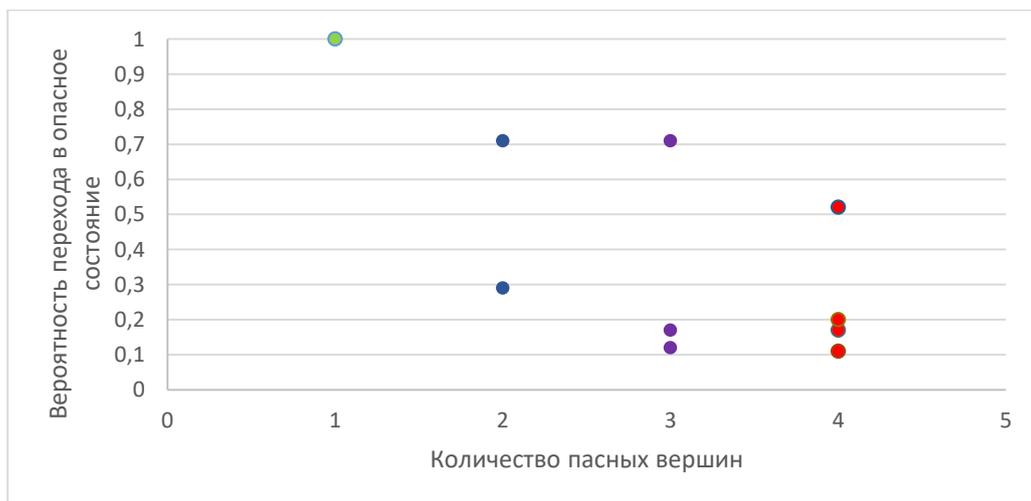


Рисунок 2.10 – Диапазоны изменения значений вероятностей перехода в опасные состояния

Таблица 2.15 – Исследование диапазона изменения значений вероятности при добавлении вершин и изменения порядка переходной вероятности

Кол-во опасных состояний	Вероятность	Номер состояний, $f$				$\sum b_{if}$
		4	5	6	7	
1	$b_{0f}$	1	x	x	x	1
2	$b_{0f}$	0,71	0,29	x	x	1
3	$b_{0f}$	0,71	0,28	$5,7 \cdot 10^{-6}$	x	1
4	$b_{0f}$	0,52	0,28	$5,7 \cdot 10^{-6}$	0,2	1

Таким образом очевидно, что размерность  $b_{0f}$  связана с размерностью переходных вероятностей  $p_{ij}$ . В случае, если значения переходных вероятностей определяют эксперты, им удобнее работать с числами порядка 0,1. Диапазон изменения значений  $b_{0f}$  составляет от 0 до 1 с шагом порядка  $10^{-2}$ .

#### 2.4.2.2 Определение диапазона изменения значений априорной вероятности появления пожароопасного состояния или пожара, рассчитанной на основе экспертных оценок

Обоснование изменения диапазонов значений вероятности  $p_j$  появления пожара на  $j$ -м объекте из-за совокупности неисправностей приведено в параграфе 2.4.2.1. Вероятность  $b_{if}$  также зависит от количества выделенных экспертами пожароопасных состояний. Чем больше состояний, тем меньше вероятность  $p_{ij}$ . Вариативные расчёты показали, что при количестве состояний до 15 вероятность  $p_{ij}$  принимает значения от  $0,0X$  до  $0, Y$  ( $X, Y$  – цифры от 1 до 9). Таким образом, диапазон изменения значений  $p_j$ , как суммы вероятностей  $p_{ij}$ , лежит в интервале от 0 до 1 с шагом порядка  $10^{-2}$ .

#### 2.4.2.3 Определение уровня риска по критерию допустимой априорной вероятности пожара

Очевидно, что шкалы  $p_j$ ,  $b_{if}$  и шкалы частот пожаров отличаются по масштабу (далее будем называть шкалу  $p_j$ ,  $b_{if}$  экспертной шкалой). Для того, чтобы перейти от оценки априорной вероятности пожароопасного состояния к прогнозу частоты пожаров необходимо найти соответствие экспертным оценкам.

Эту задачу можно сформулировать следующим образом: необходимо найти связь между экспертным мнением о значении вероятности возникновения нежелательного события (с учётом фактического состояния объекта) и частотой возникновения нежелательного события.

Задача поиска способа сопоставления двух шкал является актуальной и в других областях (психология, социология, образование, квалиметрия, спорт и др.). Исследование [103] касается сравнения двух шкал в области психологии, в работе [104] рассматривалась проблема пересчета оценок студента при переходе им из университета одной страны в университет другой, использующей иную систему оценок. Авторами [105] рассмотрены подходы к сопоставлению рейтинговых шкал.

Для решения задачи перехода от экспертной шкалы оценки вероятности пожара к шкале частот задачи введем следующие понятия и обозначения: дано две шкалы, при этом шкала частот характеризуется кортежем  $\langle X, \phi_1, Y_1, R_i \rangle$ , шкала экспертных оценок  $\langle X, \phi_2, Y_2, R_1 \rangle$ , где:

$X$  – реальный объект;

$\phi_1$  и  $\phi_2$  – отображение;

$Y_1$  и  $Y_2$  – знаковая система (единица измерения);

$R_1$  – разбиение шкалы. Разбиение шкалы полуинтервала  $[a, b)$  – конечная последовательность вида  $a = x_0 < x_1 < x_2 \dots < x_n = b$ . Каждая шкала разбита на 4 отрезка ( $P_3$  – шкала экспертных оценок,  $v$  – шкала частот), которым соответствуют качественные характеристики уровня значения: не принимаемый в расчет, допустимый, нежелательный, недопустимый (Рисунок 2.11).

При этом качественные характеристики уровня значений на шкалах тождественны, т.е. их свойства недопустимого уровня значений интервала на шкале частот совпадают со свойствами недопустимого уровня значений на шкале экспертных оценок.

Необходимо установить преобразование значений шкалы экспертных оценок к шкале частот (Рисунок 2.12).

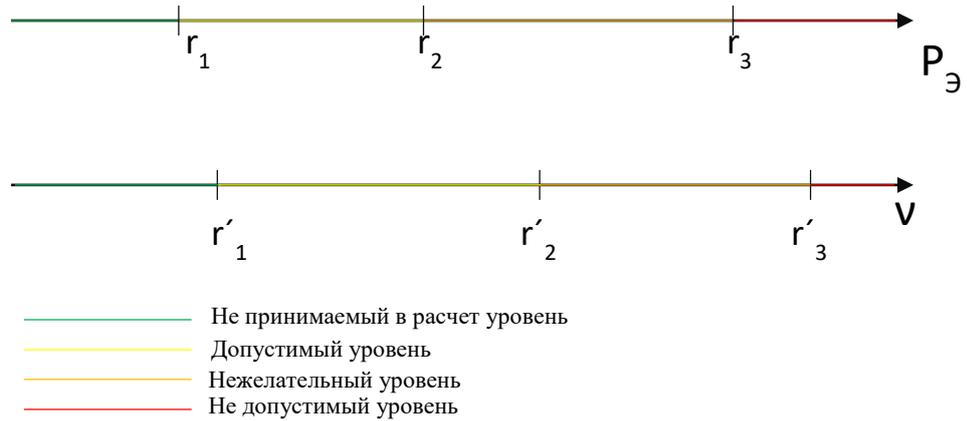


Рисунок 2.11 – Шкалы оценки показателей появления события

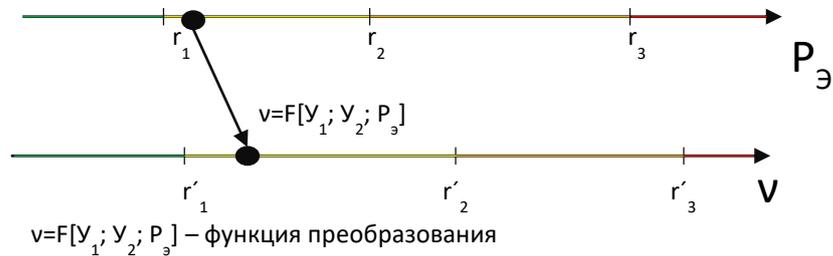


Рисунок 2.12 – Соответствие между шкалой частот и шкалой априорной оценки вероятности

Решение будем искать из предположения, что каждой точке на шкале  $P_э$  соответствует единственная точка на шкале  $v$ . При этом множеству точек на  $[r_i; r_{i+1})$  соответствует множество точек на  $[r'_i; r'_{i+1})$  в связи с тем, что  $r_i$  и  $r'_i$  обозначают определенные уровни вероятности. То есть решение задачи сводится к определению вида и параметров функции перехода  $F[Y_1; Y_2; P_э]$  для каждого разбиения шкалы.

В общем виде функция  $F[Y_1; Y_2]$  может иметь любой вид (степенной, линейный, показательный и др.), при этом виды функций на разбиениях могут отличаться. Однако, ввиду того, что нам известны только две точки  $r_i; r_{i+1}$ , попадающие в область определения функции, будем искать решения в виде линейного преобразования:

$$\begin{cases} r'_i = r_i \cdot A_k + B_k \\ r'_{i+1} = r_{i+1} \cdot A_k + B_k \end{cases} \quad (27)$$

Графический вид решения представлен на Рисунке 2.11.

Путем решения системы уравнений для каждой пары разбиений  $\{[r_i; r_{i+1}); [r'_i; r'_{i+1})\}$  аппроксимируется линейная зависимость в соответствии с графиками, приведенными на Рисунке 2.13.

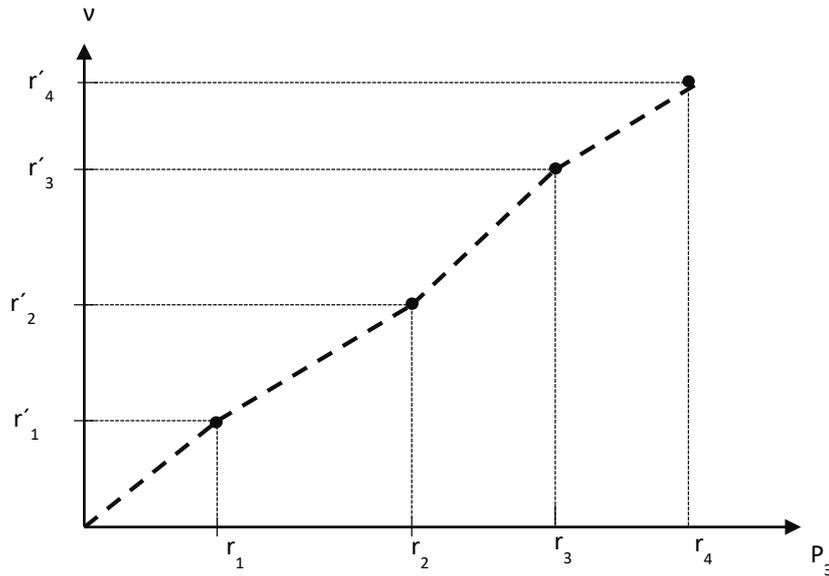


Рисунок 2.13 – Функции соответствия множества точек

Преимуществами данного подхода является то, что при известных значениях разбиения шкалы частот поиск  $F[Y_1; Y_2; P_э]$  можно свести к общему виду, например:

$$v(P_э) = \begin{cases} \frac{2,55 \cdot 10^{-4}}{r_3} \cdot P_э, & P_э \in [r_3; 1) \\ \frac{(2,55 - 1,2) \cdot 10^{-4}}{r_3 - r_2} \cdot P_э + 1,2 \cdot 10^{-4} - r_2 \cdot \frac{(2,55 - 1,2) \cdot 10^{-4}}{r_3 - r_2}, & P_э \in [r_2; r_3) \\ \frac{(2,56 - 1,23) \cdot 10^{-3}}{r_2 - r_1} \cdot P_э + 1,23 \cdot 10^{-5} - r_1 \cdot \frac{(2,56 - 1,23) \cdot 10^{-5}}{r_2 - r_1}, & P_э \in [r_1; r_2) \\ \frac{1,23 \cdot 10^{-5}}{r_1} \cdot P_э, & P_э \in [0; r_1) \end{cases}$$

Такая модель позволит также сопоставлять между собой различные экспертные оценки или оценки, полученные в других шкалах. На Рисунке 2.14 приведены результаты построения функций перехода от шкалы к шкале.

Таким образом, шкала пожарного риска для оценки объекта по фактическому состоянию имеет вид, приведенный на Рисунке 2.14.

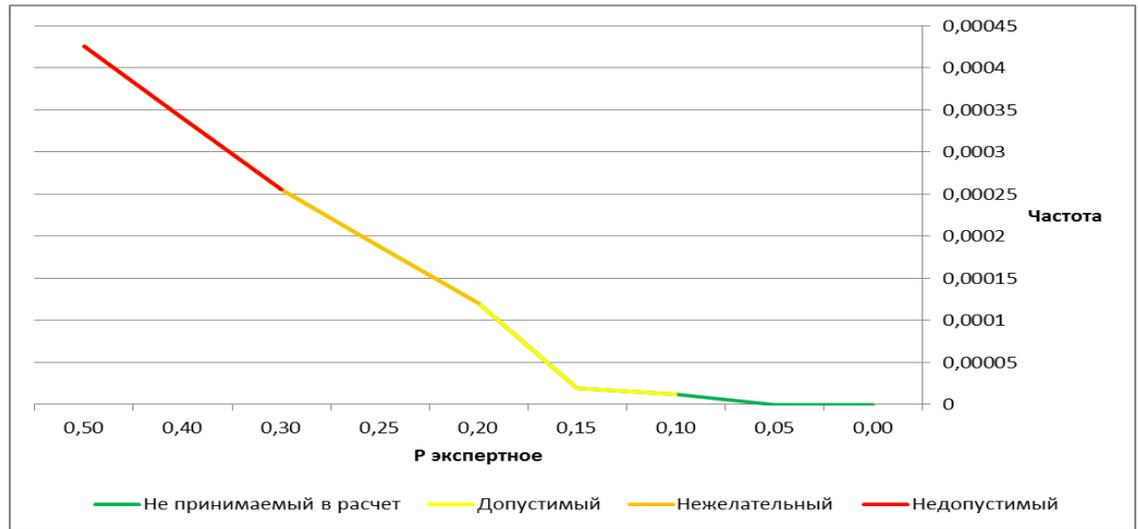


Рисунок 2.14 – Результаты построения функций перехода

### 2.4.3 Оценка времени до появления пожара на объектах железнодорожного транспорта

Если процесс развития пожара можно представить с помощью марковских моделей, то в соответствии с [81] средняя наработка до опасного состояния (при  $i$ -м начальном не опасном состоянии) рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_i \Delta G_{\bar{S}_{\text{ПБ}}}^i + \sum_k \sum_{i,j} l_k^{ij} \Delta G_{\bar{S}_{\text{ПБ}}}^i T_j}{\Delta G_{\bar{S}_{\text{ПБ}}}}, \quad (28)$$

где  $T_j$  - математическое ожидание безусловного времени пребывания (время пребывания объекта в состоянии) объекта в  $j$ -м состоянии;

$\Delta G_{\bar{S}_{\text{ПБ}}}^i$  – вес разложения графа без начальной вершины и множества опасных состояний;

$l_k^{ij}$  - вес  $k$ -го пути из начальной  $i$ -й вершины в  $j$ -ю не опасную,

$\Delta G_{\bar{S}_{\text{ПБ}}}$  - вес разложения графа без множества опасных вершин и связанных с ними дуг.

Для графа, приведенного в параграфе 2.4.1.1, среднее время до перехода в пожароопасное состояние равно:

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_i \Delta G_{\bar{S}_{\text{ПБ}}}^i + \sum_k \sum_{i,j} l_k^{ij} \Delta G_{\bar{S}_{\text{ПБ}}}^i T_j}{\Delta G_{\bar{S}_{\text{ПБ}}}} = \frac{1465,008}{0,0315} = 46508,18 \text{ [часов]} = 5,3 \text{ [года]}.$$

$T_1=5256,7$  часов,  $T_2=44$  часов,  $T_3=108$  часов,  $T_4=72,8$  часов.

Определение значений времен пребывания объекта в состояниях определяется одним из двух способов:

1) на основе статистических наблюдений. Этот способ применяется для оценки состояний, время пребывания в которых регистрируется с помощью датчиков (например состояния, связанные с уровнем масла в трансформаторе);

2) на основе экспертных оценок в условиях наличия наблюдений. Этот способ применяется для оценки состояний, которые периодически диагностируются в ходе проведения проверок. Экспертами выбираются специалисты, проводящие оценку безопасности состояния объектов ЖДТ. Они дают свои оценки на основании анализа материалов проверок. При этом работа экспертной группы проводится в 2 тура. По итогам второго тура осуществляется оценка согласованности мнения экспертов и вывод интегральной оценки;

3) на основе экспертных оценок для случаев в условиях отсутствия наблюдений. Экспертная группа в этом случае формируется методом снежного кома, а количество туров определяется в ходе работы группы.

## **Выводы по главе 2**

1. Предложен способ описания состояний объектов, позволяющий решать ряд задач численной оценки показателей пожарной опасности стационарных и передвижных объектов железнодорожного транспорта.

Такой подход позволяет наглядно продемонстрировать возможное развитие пожароопасной ситуации на объекте за счёт анализа количества путей перехода из безопасного состояния в опасное. Другим преимуществом использования графа является возможность отобразить управляющее воздействие путем добавления дуги перехода из предопасного состояния в безопасное состояние системы.

2. Разработана концепция оценки пожарных рисков на стационарных и передвижных объектах железнодорожного транспорта. В рамках концепции сформулированы принципы оценки пожарных рисков объектов ЖДТ, предназначенные для владельцев объектов защиты и специалистов, ответственных за пожарную безопасность на различных уровнях управления ОАО «РЖД». Сформулированные принципы позволяют получать следующие результаты:

— оценивать пожарные риски объектов различного функционального назначения в виде, удобном для сравнения объектов ЖДТ. При этом критерии оценки объектов разных групп могут отличаться, но результаты оценки отражаются на шкале риска.

— повышать достоверность оценки состояния объекта и избежать таких ситуаций, когда пожарный риск железнодорожного вокзала всегда выше пожарного риска поста электрической централизации из-за малого количества людей на последнем.

3. Разработан алгоритм управления пожарными рисками с указанием этапов, с помощью которых реализуются предложенные принципы. Алгоритм предусматривает апостериорную оценку пожарных рисков группы объектов ЖДТ, априорную оценку пожарных рисков объектов ЖДТ, адресное планирование мероприятий по управлению рисками, прогнозирование уровня пожарного риска для группы объектов и наблюдение за результатами проведенных мероприятий.

4. Установлено, что количество пожаров является случайной величиной. Количество информации об объектах зависит от условий их эксплуатации. Разработан алгоритм оценки пожарных рисков на стационарных и передвижных объектах ОАО «РЖД», определяющий порядок сбора информации о состояниях объектов, которые влияют на их пожарную безопасность.

5. Исследованы законы появления случайной величины «пожар» для стационарных и передвижных объектов. Определен минимально необходимый объем выборки (для передвижных объектов минимальный объем эксплуатационного парка), а также порядок интервальной оценки вероятности пожара с учётом доступного объема испытаний.

6. Разработан порядок перехода от количественных шкал последствий к качественной шкале для обеспечения возможности сопоставления результатов оценки и определения уровня риска с помощью матрицы рисков.

7. Для оценки априорного риска пожара на основе информации о начальном и возможных состояниях объекта предложен метод определения вероятности перехода объекта в опасные состояния из выявленного неопасного состояния на основе полумарковского топологического метода. Метод позволяет устанавливать численное значение вероятности перехода объекта ЖДТ в пожароопасное состояние из состояния, выявленного по результатам аудита.

8. Для случаев, когда систему невозможно представить Марковским или полумарковским процессом, разработана методика оценки априорной вероятности появления пожара на основе экспертных оценок опасности состояния. Определен порядок расчёта вероятности появления пожара из-за  $i$ -го пожароопасного состояния в зависимости от вида ТО/ТР, на котором оно должны быть компенсировано (с учётом количества пожаров, произошедших от неправильного проведения ТО/ТР определенного вида).

### ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНЫМИ РИСКАМИ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

В соответствии с ГОСТ 34.003-90 «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Термины и определения Автоматизированные системы. Термины и определения», автоматизированная система – система, состоящая из персонала и комплекса средств автоматизации его деятельности, реализующая информационную технологию выполнения установленных функций. В соответствии с этим определением в настоящей главе описаны элементы автоматизированной системы управления, реализующей управления пожарными рисками при обеспечении безопасности движения на железнодорожном транспорте:

1. персонал, реализующий процессы формирования перечня дестабилизирующих безопасность факторов – контрольно-оценочных карт (параграф 3.2.4) для проведения аудита пожарных рисков объектов железнодорожного транспорта;
2. алгоритм классификации неисправностей объектов ЖДТ, влияющих на пожарный риск стационарных и передвижных объектов ЖДТ, и формирования контрольно-оценочных карт (параграф 3.2.5);
3. персонал, реализующий процессы проведения аудита (подраздел 3.3., параграф 3.3.1);
4. способ диагностирования неисправностей объектов ЖДТ, приводящих к пожарным рискам (подраздел 3.3);
5. принципы разработки и алгоритмы работы автоматизированной системы аудита пожарной безопасности объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ (подраздел 3.4).

Основой априорной оценки пожарных рисков объектов ЖДТ является информация о их возможных и фактических состояниях. Для автоматизированного сбора такой информации необходима разработка системы аудита объектов ЖДТ,

позволяющей провести описание состояний, дестабилизирующих пожарную безопасность объектов ЖДТ, в соответствии с положениями, изложенными в параграфе 2.1. Глава 3 посвящена автоматизации процессов выявления и оценки пожарных рисков объектов железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава, а также формальному описанию модели идентификации состояний пожарной опасности объектов защиты (ОЗ) и построению алгоритма автоматизированного сбора информации о неисправностях объектов, дестабилизирующих пожарную безопасность.

### **3.1 Методы и цели аудита пожарной безопасности**

В Федеральном законе №69-ФЗ от 21.12.1994 «О пожарной безопасности» проведена прямая аналогия между независимой оценкой пожарного риска и аудитом пожарной безопасности (АПБ). АПБ - оценка соответствия объекта защиты требованиям пожарной безопасности и проверка соблюдения организациями и гражданами противопожарного режима, проводимые не заинтересованным в результатах оценки или проверки экспертом в области оценки пожарного риска. Такой аудит проводится аттестованными для проведения независимой оценки пожарных рисков экспертами (аттестация проводится в соответствии с установленным в Российской Федерации порядком). Результаты аудита позволяют выявить лишь часть проблем, преимущественно связанных с путями эвакуации и системами пожаротушения. При этом значительная часть вопросов, связанная с состояниями потенциальных источников огня и потенциальных пожароопасных событий, остается неосвещенной. Причин таких «темных пятен» три. Первая - отсутствие нормативной документации для части объектов железнодорожного транспорта. Вышедший только в 2018 г. ГОСТ 34394-2018 «Локомотивы и моторвагонный подвижной состав. Требования пожарной безопасности» устанавливает требования к огнестойкости конструкции вновь разрабатываемых локомотивов. Эксплуатационный парк ОАО «РЖД» включает множество локомотивов с периодом эксплуатации от 5 до 25 лет, на которые

действия этого ГОСТа распространяются не в полной мере. Вторая причина - недостаточная компетенция аудиторов в части железнодорожных технологических процессов. И третья, наиболее существенная – невозможность одновременного привлечения надзорных органов для аудита всех объектов железнодорожного транспорта. Невозможно одновременно оценить все объекты одной группы.

Другим важным фактором является то, что условия, в которых эксплуатируются объекты ЖДТ, являются лишь условно стационарными. Вокзалы ежедневно обслуживают сотни людей, подвижной состав имеет короткие циклы ТОиР, на посты ЭЦ оказывает влияние оборудование, располагаемое вне зданий. Все это приводит к тому, что результаты аудитов, проводимых аккредитованными организациями, быстро теряют актуальность.

Таким образом, аудит пожарной безопасности, проводимый в соответствии с Федеральным законом №69-ФЗ от 21.12.1994, способствует достижению установленной нормативными документами цели, но не может стать частью системы управления пожарной безопасностью в ОАО «РЖД».

Для аудита пожарной безопасности объектов ЖДТ была сформулирована следующая цель – установление соответствия фактического состояния объекта железнодорожного транспорта требованиям пожарной безопасности<sup>20</sup> и оценка уровня пожарного риска по результатам выявленных пожароопасных состояний.

Для достижения этой цели метод аудита объектов ЖДТ должен включать взаимодействие с людьми, т.к. это обеспечит вовлечение работников объектов ЖДТ в новую систему управления пожарной безопасностью, а также повысит эффективность сбора данных в части анализа объектов с высоким уровнем технической сложности. В соответствии с классификацией ГОСТ Р ИСО 19011-2012 «Руководящие указания по аудиту систем менеджмента» существует 4 основных метода аудита с вовлеченностью сотрудников проверяемой организации: проведение интервью, заполнение проверочных листов с вопросников с участием персонала проверяемой организации, проведение анализа документации с

---

<sup>20</sup> В т.ч., установленными внутренними документами ОАО «РЖД»

участием персонала проверяемой организации, осуществление представительных проверок. Наиболее подходящим является метод аудита посредством заполнения проверочных листов, т.к. это позволяет передавать, хранить и отслеживать изменение информации. Вовлечение сотрудников объекта ЖДТ в проверку позволит значительно сократить трудовые и временные ресурсы на проведение аудита, что позволит делать его систематическим. Последнее является обязательным условием для инструмента управления пожарной безопасностью.

Проверочные листы (контрольно-оценочные карты) должны содержать в себе перечень необходимых для расчёта пожарного риска свидетельств аудита. Этими свидетельствами являются состояния пожарной опасности объектов ЖДТ. Как было отмечено ранее, для формирования такого перечня недостаточно существующей нормативной документации. В параграфе 3.2 исследуется исходная информация о состоянии пожарной опасности объектов ЖДТ, располагаемая ОАО «РЖД» и способная стать источником информации для формирования проверочных листов.

### **3.2 Анализ и оценка состояния пожарной безопасности на железнодорожном транспорте. Методы анализа и классификация пожароопасных состояний**

Для того, чтобы аудит пожарной безопасности объектов ЖДТ был эффективным, и его результаты могли быть использованы для оценки пожарных рисков и управления пожарной безопасностью, необходимо, чтобы критерии аудита были связаны с состояниями, которые действительно могут привести к пожару. Успешно сформулированным критерием аудита является критерий, для которого можно собрать свидетельства и которому в соответствие можно поставить значение, характеризующее степень влияния на пожарную безопасность. Предпочтение должно отдаваться тем критериям и свидетельствам, которые уменьшают степень неопределенности состояния объекта. Так свидетельства должны иметь «статистическую историю». Именно от накопленной статистики причин пожаров зависит успешность формулирования критерия аудита.

От описания вида и структуры данных о состоянии пожарной безопасности объектов многое зависит: состав классификаторов, критерии аудита, структура исходных данных. В случае анализа пожарной безопасности статистические данные – это значение некоторого признака, свойственного объекту ЖДТ и влияющего на возможность инициации или распространения горения. Значения могут быть количественными или качественными. При измерении по нескольким количественным или качественным признакам в качестве статических данных об объекте получаем вектор [90]. Векторные исчисления связаны с применением громоздкого математического аппарата, а также с необходимостью формировать систему координат и определять перечень операций, которые можно было бы применять при обработке разнотипных данных. Для обеспечения возможности практического применения результатов исследования целесообразно декомпозировать задачу до анализа одномерных наблюдаемых величин, определить одномерные статистические методы исследования, последовательное применение которых даст столько же информации об объекте, сколько и

многомерный анализ. В соответствии с типом исходных данных все возможные методы анализа разбиваются на две части – числовую статистику и статистику объектов нечисловой природы. Последнее имеет ключевое значение по двум причинам. Во-первых, источником большей части информации о случаях пожара на объекте ЖДТ являются акт о пожаре и заключение о непосредственной (технической) причине пожара, имеющие форму анкеты с открытыми вопросами. Эти документы содержат информацию в числовом и нечисловом виде. Другой причиной является характер оценки влияния состояния объекта ЖДТ на возможность возникновения пожара. Основным источником такой информации является мнение эксперта, обычно выраженное в нечисловом виде.

Подход, предлагаемой в данной работе, ориентирован на формирование перечня факторов пожарной опасности, относящихся к объектам числовой и нечисловой природы и формирующих наиболее полную информацию, необходимую для построения модели оценки пожарных рисков.

### **3.2.1 Выбор способов получения и анализа данных о пожарной безопасности объекта железнодорожного транспорта**

Анализ должен быть построен таким образом, чтобы его результаты могли быть использованы для оценки комплексных показателей безопасности [83, 106]. Кроме того, несомненным является прикладной характер такого анализа. Ввиду этого факта важно отметить, что непосредственная задача прикладных исследований – применение результатов фундаментальных исследований для решения не только познавательных, но и социально-практических проблем [107].

При решении задачи, связанной с обработкой данных о пожарной безопасности объекта ЖДТ, исследователь располагает двумя источниками информации. Первый – это результаты наблюдений за случаями пожаров, порождающие информацию в виде выборки данных из некой генеральной совокупности. Объем такой выборки ограничен двумя факторами: периодом наблюдения и количеством наблюдаемых признаков. При этом количество наблюдаемых признаков в течение всего периода наблюдения может отличаться из-за изменения системы учёта и хранения данных.

Второй источник – это информация о конструктивных характеристиках объекта и возможных нарушениях при техническом содержании и эксплуатации, приводящих к появлению пожароопасных ситуаций, накопленных к моменту начала анализа. Эти данные, в отличие от наблюдаемых признаков, имеют структурированный вид. Таким образом, при работе с источниками информации в первую очередь решалась задача извлечения данных, т.е. структурирование данных из неструктурированных или слабоструктурированных документов. В Таблице 3.1 приведена классификация источников информации о пожарной безопасности объектов и способы извлечения данных из источников для дальнейшего анализа.

Таблица 3.1 – Анализ – классификация способов получения данных о пожарной безопасности объекта ЖДТ

Тип источника	Источник	Способ извлечения данных
Документальный	Акт служебного расследования	Ручной анализ: упорядочивание данных, систематизация данных
	Заключение о непосредственной (технической) причине пожара	
	Акт осмотра объекта	
	Журнал технического состояния	Ручной анализ: логический анализ, систематизация данных, экспертный анализ
	Автоматизированная система управления пожарной безопасностью	Группировка данных, первичный статистический анализ
Экспертная группа	Анализ состояния пожарной безопасности в ОАО «РЖД»	Ручной анализ: обобщение и классификация данных
Эксперимент	Наблюдение в измененных условиях	Ручной анализ: регистрация, логический анализ и систематизация данных

Формирование выборки осуществляется на этапе первичной обработки данных. Результатом извлечения данных из первоисточника является частично упорядоченная информация числового и нечислового характера. Эта информация отличается по уровню структуризации, однородности, а главное по уровню взаимосвязи данных друг с другом и анализируется в соответствии с алгоритмом, представленным на Рисунке 3.1. Цель анализа – формирование перечня факторов пожарной опасности, описания взаимосвязи между ними для априорной оценки вероятности появления пожара.

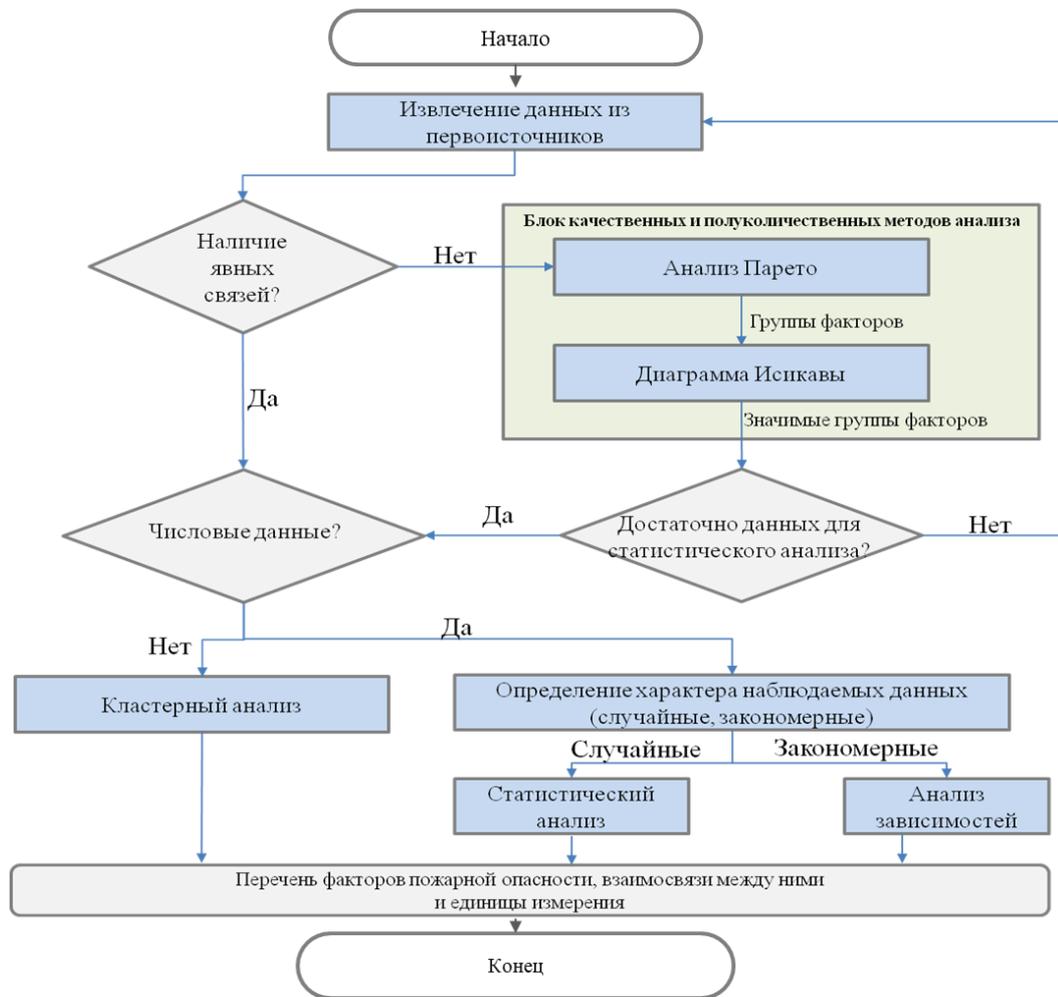


Рисунок 3.1 – Алгоритм выбора метода анализа данных

Выбор метода анализа данных осуществляется после извлечения данных из первоисточников и приведения их к структурированному виду. В качестве первоисточников выступают:

— материалы расследования случаев пожара: материалы служебного расследования пожара<sup>21</sup> (технический акт о состоянии подвижного состава после пожара, заключение о непосредственной технической причине пожара, акт осмотра места пожара и др.), протоколы расследований, справки. Вид данных – текстовый. На 2021 г. действующим документом (с 2019 г.), регламентирующим расследование случаев пожара является Регламент по организации служебных

<sup>21</sup> Перечень материалов определяется действующими документами ОАО «РЖД», в т.ч. утратившими силу, например Инструкцией по служебному расследованию, учету пожаров и последствий от них на железнодорожном транспорте (утв. первым заместителем Министра путей сообщения Российской Федерации 17 декабря 1992 года N ЦУО-130).

расследований, учета пожаров и их последствий в ОАО «РЖД» (утв. распоряжение ОАО «РЖД» от 31.05.2019 N 1079/р). До 2019 г. действовала инструкция N ЦУО-130;

— данные о количестве и причинах пожаров из автоматизированной системы управления пожарной безопасностью в ОАО «РЖД» (далее – АСУ ПБ);

— данные об отказах технических средств из системы КАСАНТ.

Материалы расследования случаев пожара могут храниться в электронном и бумажном виде. Шаблоны документов меняются с течением времени как по форме, так и по содержанию. Кроме этого, документы одного временного периода, заполненные в различных структурных подразделениях, могут иметь структурные различия из-за человеческого фактора, что затрудняет автоматизацию анализа материалов расследования. Однако при известных шаблонах документов может быть осуществлен анализ соответствия текста типовому документу с помощью методов машинного обучения [108, 109], а также распознавание текста для автоматизированного формирования структурированной информации. В частности, из материалов расследования может быть извлечена следующая информация:

1. дата пожара;
2. наименование объекта;
3. место пожара, включая: региональная дирекций;
4. виновные;
5. серия и номер подвижного состава (если пожар произошел на подвижном составе);
6. непосредственная техническая причина пожара.

Структуризация данных о случаях пожаров проводится таким образом, чтобы на основе статистических или экспертных оценок возможно было установить наличие явных связей между состоянием объектов ЖДТ и пожарами на них. Пример структуризации данных из различных источников приведен в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Данные о пожарах и отказах на тяговых подстанциях (пример на данных 2011-2016 гг.).

Объект тяговой подстанции	Причина отказа	Количество отказов (не пожаров)	Количество пожаров	Даты пожаров
Силовой трансформатор 110кВ переменного тока	Просадка напряжения во внешней сети	190	0	-
	Отключение по защите	1	3	15.03.2013, 03.04.2016, 04.06.2011
	Механическое разрушение	1	3	08.04.2013, 24.02.2015, 31.07.2011
	Пережог	1	1	21.09.2011
	Повреждение в сетях внешнего электроснабжения	1	0	-

Основным инструментом анализа наличия связей является корреляция. Однако ее расчет затруднен из-за малого количества пожаров по конкретным причинам (Таблица 3.2 для тяговых подстанций и Таблица 3.3 для тепловозов) в течение месяца. Интервалом анализа выбран месяц, т.к. по оценкам экспертов ОАО «РЖД» это период времени, за который состояние объекта ЖДТ может измениться существенным образом. В Таблице 3.3 для облегчения чтения использованы цветовые маркеры: красный цвет – среднее число пожаров более 0,13 случаев в месяц; оранжевый – от 0,08 до 0,13; желтый – от 0,05 до 0,08; зеленый – менее 0,08.

Таблица 3.3 – Данные о среднем количестве пожаров из-за состояния узлов тепловозов (интенсивность возгорания узла тепловозов)

Узел, состояние которого стало причиной пожара	Среднее число пожаров в месяц		
	Серии		
	2ТЭ10	3ТЭ10	2ТЭ116
Выхлопная система	0,111	0,083	0,028
Турбокомпрессор	0,194	0,139	0,056
Топливная система	0,111	0,139	0,111
Масленная система	0,222	0	0
Главный генератор	0,194	0,057	0,028

ВВК	0,194	0,111	0,139
Силовые электрические цепи (кабельная продукция)	0,139	0,167	0,056
Электрические цепи управления	0,056	0	0,111
Аккумуляторные батареи	0,028	0	0,028
Статические преобразователи, выпрямители	0	0	0,111
ТЭД	0,222	0	0,111
Дренажная система	0,056	0,028	0
Дизель	0,028	0,028	0
Система охлаждения	0,056	0	0,028
Тормозные резисторы	0	0	0

Из таблиц 3.2 и 3.3 видно, что есть объекты (или причины), пожары на которых происходят чаще других. Для анализа таких данных применяются методы качественного и полуквантитативного анализа (параграф 3.2.2). Для применения статистических методов анализа (помимо анализа связей) необходимо удостовериться в достаточности данных в соответствии с положениями, приведенными в параграфе 2.2.1.3.

Большая часть данных о случаях пожара имеет нечисловой характер. Для анализа такой информации и приведения ее к виду, который можно обработать автоматически, предложен способ кластерного анализа на основе оценки расстояния Хэмминга (параграф 3.2.3). Далее, на основании результатов анализа формируется перечень факторов пожарной опасности, определяются взаимосвязи между ними (параграф 3.2.4). В дальнейшем этот перечень используется при формировании классификаторов пожароопасных состояний (параграф 3.2.5). Метод автоматизированного описания процессов возникновения и развития пожароопасных ситуаций на стационарных и передвижных объектах ЖДТ до появления открытого горения описан в параграфе 3.2.5.

При обработке числовых данных в первую очередь необходимо определить, как было показано в параграфе 2.4.1, характер наблюдаемой величины: является ли она случайной. В ходе исследования установлено (Приложение А, Раздела А.1), что для всех анализируемых объектов пожар является случайным событием. К методам анализа закономерностей (не применимых в рамках диссертационного

исследования из-за отсутствия необходимости) относятся: регрессионный анализ, методы теории принятия решений.

Результатом применения алгоритма анализа данных является перечень факторов опасности (пожароопасных неисправностей), выводы о взаимосвязях между ними.

### **3.2.2 Качественные и полуколичественные методы анализа пожарной безопасности на примере тягового подвижного состава**

В ходе извлечения данных из первоисточника и группировки данных о количестве и причинах пожара установлено, что из 344 пожаров на тепловозах и электровозах с 2011 по 2015 г. 201 пожар произошел по вине ремонтных локомотивных депо (ТЧР), 31 – по вине сервисных предприятий, 35 – по вине эксплуатационных локомотивных депо (ТЧЭ), 15 – по вине локомотиворемонтных заводов, 5 – по вине других сторонних организаций.

Стоит отметить, что большинство сервисных компаний, которые на данный момент не входят в структуру ОАО «РЖД», ранее были ремонтными локомотивными депо. Несмотря на реструктуризацию и перевод части ТЧР в общества с ограниченной ответственностью, не относящиеся к структурным подразделениям ОАО «РЖД», проблема с возникновением пожара по вине ТЧР и сервисных компаний осталась актуальной. Изменилось лишь процентное соотношение. Если в 2011-2013 гг. количество пожаров по вине ТЧР составляло около 80%, по вине сервисных предприятий - 4 %, то в 2014 г. ТЧР и сервисные компании разделили вину по 46 % и 41 % соответственно, т.е. 80 % пожаров в течении следующих 4 лет происходило по причине некачественного проведения ремонтов. Анализ Парето по виновным в случаях пожара приведён на Рисунке 3.2.

Из диаграммы Парето видно, что более 80% пожаров происходят по вине ТРЧ, ТЧЭ и сервисных компаний и главной причиной возникновения пожара на тяговом подвижном составе (ТПС) справедливо считать некачественное проведение технических осмотров и ремонтов. Это означает, что дальнейший анализ должен быть посвящён детализации и структуризации данных о конкретных

состояниях локомотива, приводящих к появлению пожаров, или действий работников, эксплуатирующих и ремонтирующих его.

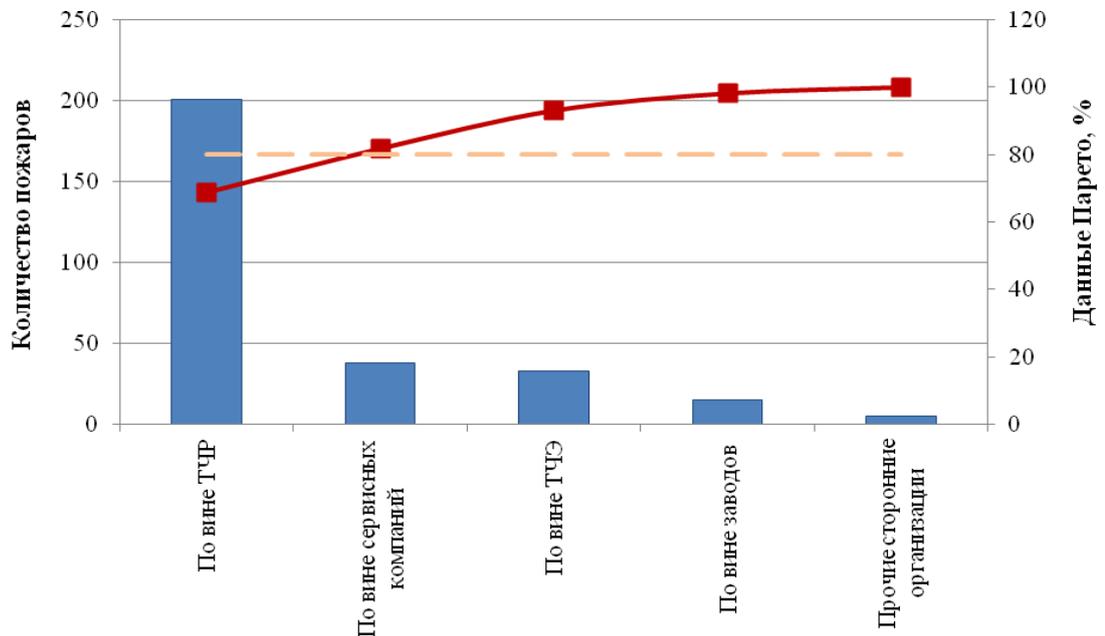


Рисунок 3.2 – Диаграмма Парето распределения виновных за пожары на тепловозах и электровозах за рассматриваемый период

Однако, прежде чем перейти к такому анализу важно учесть фактор различия конструкций локомотивов различных серий. На Рисунке 3.3 представлено количество пожаров за рассматриваемый период по сериям тепловоза. Из рисунка 3.3 видно, что 37,6 % всех пожаров на тепловозах за рассматриваемый период приходится на серию 2(3)ТЭ10М, 19 % – серия 2(3)ТЭ116, 12,4 % – серия 2(3)ТЭ10В, 10,1 % – серия 2(3)ТЭ10МК. Это можно объяснить тем, что большую часть (63 %) эксплуатационного парка тепловозов по всей сети ОАО «РЖД» составляют серии 2ТЭ10 и 2ТЭ116. Они являются наиболее часто эксплуатируемыми, что также является фактором высокой статистики пожара по данным сериям. Оставшиеся 37 % эксплуатационного парка тепловозов по всей сети ОАО «РЖД» составляют серии, для которых нет статистических данных или пожары редки.

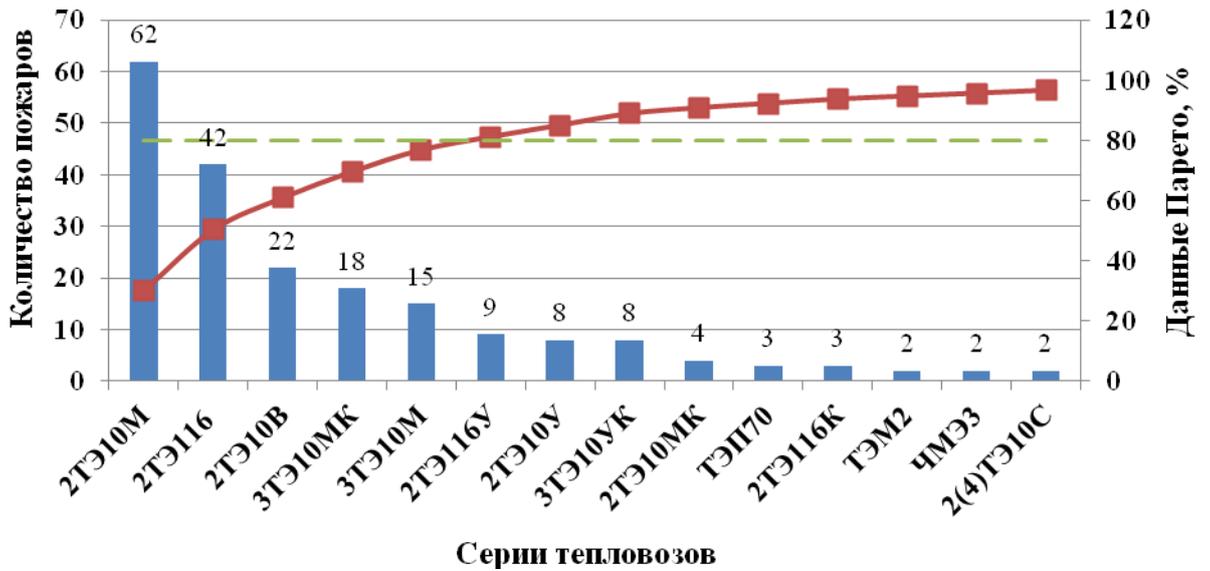


Рисунок 3.3 – Количество пожаров за 2011-2015 гг. по сериям тепловозов

Из диаграммы Парето, представленной на Рисунке 3.3, можно сделать вывод, что наибольшее количество пожаров приходится на серии тепловозов 2ТЭ10М, 2ТЭ116, 2ТЭ10В, 3ТЭ10МК а 3ТЭ10М, 2ТЭ116У (на них приходится 80% пожаров). В ходе изучения материалов разбора пожаров установлена причинно-следственная связь возникновения пожара по причинам технических неисправностей. На Рисунке 3.4 представлена диаграмма Исикавы, отображающая причинно-следственные связи между пожаром на локомотивах и факторами, влияющими на него. По правилам построения диаграммы Исикавы факторы, которые усугубляют проблему, отражают стрелками, направленными к основной стрелке вправо, а те, которые нейтрализуют проблему – с наклоном влево. К нейтрализующим факторам относятся элементы системы противопожарной защиты (далее – СППЗ): установки пожарной сигнализации (УПС); установки пожаротушения (УПТ); огнетушащие вещества (ОГН) отражены как нейтрализующие факторы. Таким образом, видно, что на возникновение пожара на тяговом подвижном составе может влиять как отдельно взятый показатель, так и совокупность показателей различных факторов. На диаграмме Исикавы для локомотивов (Рисунок 3.4) цветом выделены показатели факторов, которые в большинстве случаев являлись причиной возникновения пожара на тепловозах

серий 2ТЭ10М, 2ТЭ116, 2ТЭ10В, 3ТЭ10МК (серии с наибольшим количеством пожаров на единицу подвижного состава). На диаграмме Исикавы для тяговых подстанций (Рисунок 3.5) приведены доли причин отказов с разбиением устройствам.

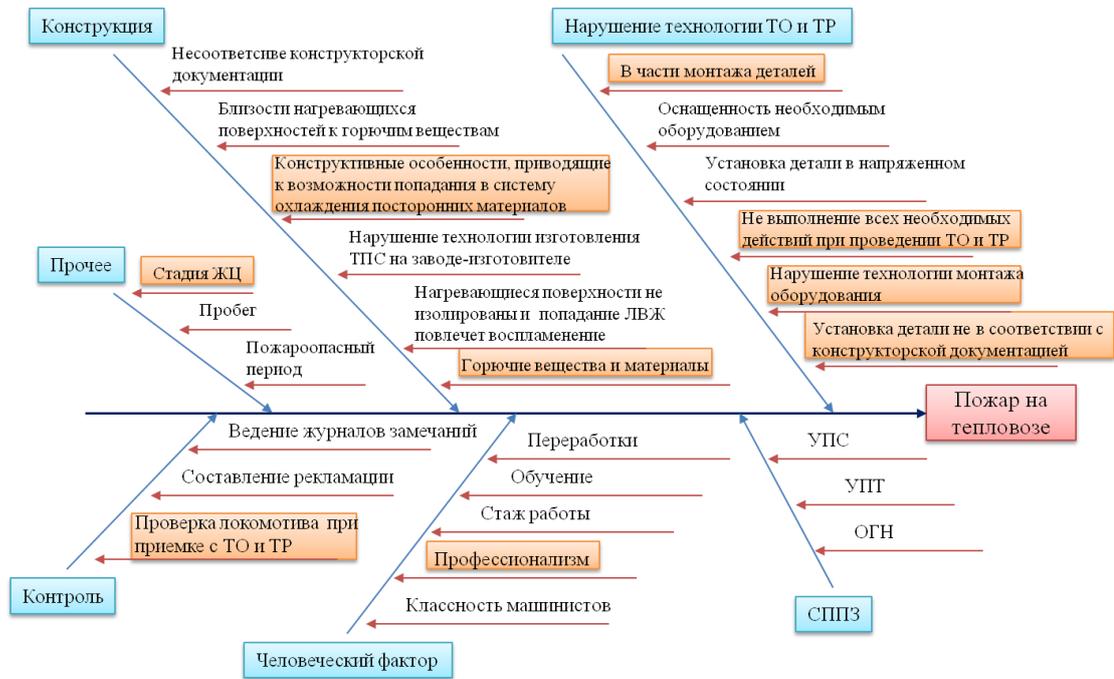


Рисунок 3.4 – Причинно-следственные связи пожаров на тепловозах и электровозах и факторов, влияющих на возникновение пожара

Поскольку наиболее часто горят тепловозы определенных серий, рассмотрим подробно, какие именно узлы данных серий являются пожароопасными. На Рисунке 3.6 представлен анализ пожаров на тепловозах серий 2ТЭ10М, 2ТЭ116, 2ТЭ10В, 3ТЭ10МК за рассматриваемый период по узлам возникновения пожара.

Из диаграммы Парето, представленной на Рисунке 3.6, видно, что наибольшую часть пожарной опасности (80 %) для данных серий представляет следующее множество узлов: электрические цепи управления, силовые электрические цепи, тяговый электродвигатель, масляная система, топливная система, турбокомпрессор, дизель, выхлопная система, вспомогательные электрические машины. На данном этапе анализа можно говорить о формировании

выборки пожароопасных узлов, оценка пожарной безопасности которых будет характеризовать основную часть пожарной безопасности ТПС в целом.

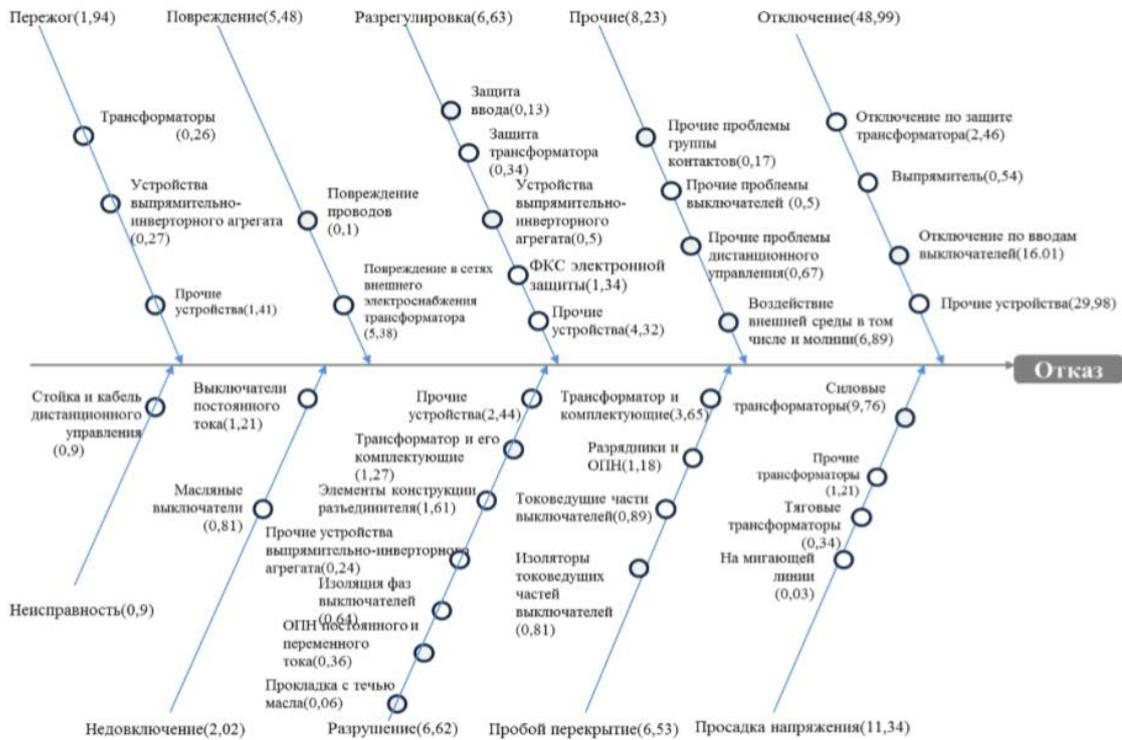


Рисунок 3.5 – Отказы устройств на тяговых подстанциях

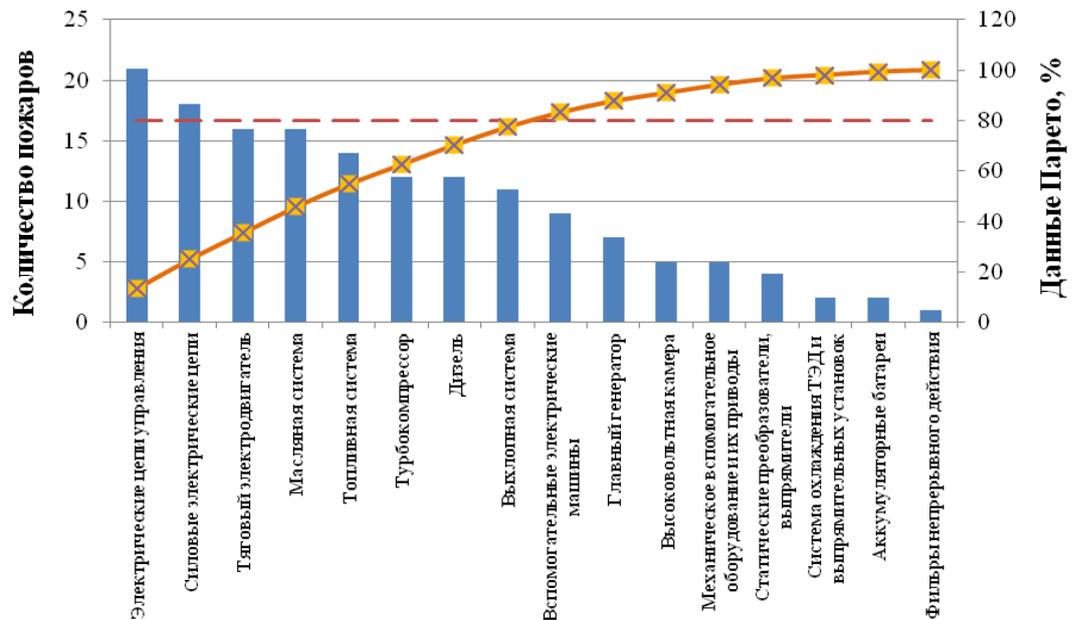


Рисунок 3.6 – Количество пожаров по пожароопасным узлам тепловозов

При этом каждый из пожароопасных узлов имеет определенные сборочные единицы и детали, которые являются инициаторами пожара. Так, например, для электрических цепей это изоляция и жилы. У тяговых электродвигателей это более обширный список – от якоря до подводящих кабелей. На условия возникновения пожара также оказывают влияние и пожароопасные события, которые приводят к пожару в определенном узле. Рассмотрим их более подробно. При разборе материалов расследования пожаров на тепловозах чаще всего встречались события короткого замыкания, приводящие к появлению искры и дальнейшему возгоранию жил кабелей и проводов. Перечень пожароопасных событий для тепловозов: электрическая дуга, искры короткого замыкания из-за замыкания проводов друг на друга, на корпус, искры короткого замыкания из-за межвиткового замыкания, круговой огонь, горение легко воспламеняющихся веществ, нагрев, раскаленные газы, другое. Описанные характеристики тепловоза, влияющие на его пожарную безопасность, являются нечисловыми, поэтому в соответствии с алгоритмом выбора метода анализа данных (Рисунок 3.1) для дальнейшего анализа таких данных использован кластерный анализ.

### **3.2.3 Кластерный анализ нечисловых статистических данных на примере тягового подвижного состава**

На основе информации материалов расследований и данных из автоматизированной системы пожарной безопасности сформированы сценарии развития пожаров. Под сценарием пожара понимается последовательность событий или состояний объекта ЖДТ, которые приводят к появлению пожароопасного состояния. Для анализа и перехода от сценариев пожара к систематизированному перечню неисправностей объектов ЖДТ целесообразно использовать представление информации о состояниях безопасности в образах теории множества [106]. Множества опасных пожароопасных событий ТПС представлены в виде частично-упорядоченных множеств.

В результате анализа данных по пожарам построены цепи пожароопасных событий, каждому из которых соответствовали определенные узлы и пожароопасные неисправности.

Дальнейший анализ посвящен построению типовых цепей событий (состояний или неисправностей). Под цепью событий понимается последовательность с конечным или счётным бесконечным числом событий, характеризующаяся тем свойством, что, говоря нестрого, состояние, которое встречается перед или после функционирования ТПС, соответствует определённому набору параметров, которые не зависят от состояния локомотива до формирования цепи событий.

*Объект анализа* – цепь событий – частично упорядоченное множество. *Задача анализа* –выработать правила поиска общих признаков в цепях событий и формирование цепей с общим признаком сценариев типовых событий. Для осуществления задачи анализа будет оцениваться близость цепей событий кластерным анализом [110, 111, 112].

Формализуем ряд понятий:

$Z$  – частично упорядоченное множество всех цепей событий.  $A_i$  – частично упорядоченное подмножество (далее – ЧУП) множества  $Z$   $i$ -го типа.  $B_j$  – ЧУП множества  $Z$ .

Каждое подмножество  $B_j$  можно заменить на универсальное подмножество, характеризующее множество  $i$ -го типа ( $A_i$  подмножество).

Для оценки расстояния между двумя подмножествами  $B_k$  и  $B_l$  –  $d_{lk}$ , характеризующее близость подмножеств, использован метод, предложенный Хэммингом – расчет числа позиций, в которых события (символы) не совпадают. Расстояние Хэмминга  $d_{lk}$  рассчитывается по формуле (28):

$$d_{lk} = \sum_{i=1}^5 r_i, \quad r_i = \begin{cases} 0, & x_{ki} = x_{li} \\ 1, & x_{ki} \neq x_{li} \end{cases}, \quad (29)$$

где  $x_{ki}$  – событие на  $i$ -м месте в подмножестве  $B_k$ ;

$x_{li}$  – событие на  $i$ -м месте в подмножестве  $B_l$ .

Объединив подмножества  $B_j$  по признаку  $d_{lk}$ , получим кластер. В Таблице 3.4 представлено соответствие значения признака  $d_{lk}$  и уровня схожести.

Таблица 3.4 – Расстояние между подмножествами и уровень схожести

	<i>d</i>				
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Уровень схожести</b>	Сильная	Заметная	Незначительная	Слабая	Нет

Для формирования цепочек с общим признаком сценариев типовых событий подмножества брались с уровнем схожести «сильная» и «заметная».

Результат формирования кластеров событий представлен в Таблице 3.5. Мощность кластера – количество входящих и совпадающих цепочек событий. ПС – пожароопасное событие. В случае если к появлению последнего пожароопасного события приводило менее 5 событий, то последовательность описывается следующим образом:

- последнее пожароопасное событие ставится на 5-е место (ПС5);
- первое пожароопасное событие ставится на место ПС1, второе на место ПС2 и т.д.,
- в незаполненных местах ставятся 0.

Таблица 3.5 – Пример объединенных в кластеры событий

Мощность	Года/месяцы		ПС1	ПС2	ПС3	ПС4	ПС5
8	2014 октябрь	Центр кластера	Разрушение, излом	Искрение	Попадание искр	0	Искра
	2013 март	Элементы кластера	Отсутствие (детали)	Искрение	Попадание искр	0	Искра
	2013 май		Повреждение	Искрение	Попадание искр	0	Искра
	2014 апрель		Применение нетиповых деталей	Искрение	Попадание искр	0	Искра
	2013 май		Применение нетиповых деталей	Искрение	Попадание искр на турбину	Попадание искр в вентиляцию	Искра
	2014 март		Неисправность	Искрение	Попадание искр	0	Искра
	2014 апрель		Повреждение	Искрение	Попадание искр	0	Искра
	2013 июль		Разрушение, излом	Искрение	Попадание искр	0	Искра

Аналогичным образом формировались типовые группы узлов пожаров. Для построения типовых сценариев развития пожара на тепловозах был проведен анализ соответствий типовых групп узлов пожарам из кластера событий. Если пожарам из типовых групп узлов соответствуют пожары из кластера событий, значит, из них можно сформировать сценарий. Часто реализуемые сценарии формируются при соответствии хотя бы 4 пожаров (определено экспертно). Число соответствующих пожаров – мощность сценария. В Таблице 3.6 приведены примеры сформированных сценариев пожара на тепловозах.

Результатом анализа нечисловых данных являются сценарии пожара, включающие узлы и последовательности событий, приводящих к пожару. При оценке пожарного риска по фактическому состоянию ТПС должны учитываться те состояния, которые влияют на вероятность появления описанных сценариев пожара [113].

Таблица 3.6 – Сформированные сценарии пожаров на тепловозах

№	Узлы	События				Мощность
		Отсутствие (детали)	Повреждение	Применение нетиповых деталей	Разрушение, излом	
1	Выхлопная система дизеля	Отсутствие (детали)	Повреждение	Применение нетиповых деталей	Разрушение, излом	4
	Система охлаждения	Искрение	Попадание искр			
2	Топливная система	Отсутствие (детали)	Неправильный монтаж	Повреждение/износ (старение)	Излом	4
	Выхлопная система, дренажная система	Нагревание легковоспламеняющихся материалов и веществ, их попадание на горячие части локомотива				
3	Электрооборудование	Нарушение изоляции/перетирание, пробой	КЗ проводов	КЗ на корпус	Нагрев	8

Системный подход к применению различных видов анализа позволяет определить перечень параметров объектов железнодорожного транспорта, которые следует учитывать при оценке рисков, установить шкалу измерений и характер наблюдаемых величин. На основании этой информации формируются перечни

неисправностей объектов ЖДТ для определения величины пожарного риска на стационарных и передвижных объектах ЖДТ. Следующим шагом является оценка влияния выявленных при аудите состояний на вероятность появления пожара.

Первое событие сценария пожара являются инициирующим. Управление пожарной безопасностью сводится к задаче предотвращения появления инициирующих событий. Следующим этапом анализа является определение условий, в которых они появляются. Для каждого узла (или оборудования) должен быть определен перечень состояний – неисправностей, появление которых приводит к появлению одного или нескольких инициирующих событий. Т.к. у объекта может быть несколько неисправностей или же объект может переходить из одного состояния в другое, то можно выделить следующие виды взаимосвязей между ними.

Виды взаимосвязей:

1. последовательный – развитие пожароопасных состояний происходит путем перехода из одного состояния в другое;
2. накопительный – развитие пожароопасной ситуации тем более вероятно, чем больше пожароопасных неисправностей допущено по отношению к объекту;
3. смешанный – развитие пожароопасной ситуации возможно из-за накопления неисправностей, не переходящих друг в друга, а также из-за последовательного перехода объекта из одного состояния в другое.

### **3.2.4 Формирование перечня факторов пожарного риска – пожароопасных неисправностей**

Для объекта ЖДТ на основании сформированных сценариев пожара, перечня пожароопасных узлов и событий устанавливаются перечни пожароопасных неисправностей. Для этого осуществляется группировка сценариев пожара по узлам (например, в Таблице 3.6 приведено 2 сценария, в которых участвует выхлопная система) или объектам. Дальнейшие работы осуществляются с привлечением экспертов. В виду того, что система управления пожарной безопасностью в ОАО «РЖД» является иерархичной, при формировании

экспертной группы целесообразно использовать метод снежного кома со следующими особенностями реализации:

1. первым экспертом назначается специалист, ответственный за пожарную безопасность на центральном уровне управления. Это нулевой эксперт;

2. нулевой эксперт рекомендует для включения в экспертную группу специалистов, имеющих компетенции в области технического обслуживания, проектирования и контроля состояний объектов ЖДТ. В качестве таких специалистов могут выступать работники проектно-конструкторских бюро, технических служб, специализированных институтов. Это эксперты центрального уровня управления;

3. эксперты центрального уровня управления рекомендуют специалистов регионального уровня управления;

4. специалисты регионального уровня управления рекомендуют специалистов линейного уровня управления.

В случае, если объектом ЖДТ является многофункциональный объект, например, пост ЭЦ, на котором эксплуатируется оборудование различных хозяйств, то вышеописанная процедура формирования экспертной группы осуществляется для каждого хозяйства.

Далее, на основании документации по техническому обслуживанию и ремонту экспертами осуществляется декомпозиция узлов – выделение составляющих, по отношению к которым осуществляются операции диагностики, ремонта, замены. Задачей экспертов является включение в перечень тех частей узла/объекта, из-за состояния которых были или могли бы быть пожары. Если эксперты не могут прийти к единому мнению о перечне факторов, то применяются методы вывода итогового мнения экспертов.

Пример такой декомпозиции приведен в Таблице 3.7. По решению экспертной комиссии к перечню частей узла может быть добавлен перечень условий эксплуатации (технического обслуживания).

Таблица 3.7 – Декомпозиция узла

№ п.	Узел/Оборудование	№ п.п.	Часть узла/оборудования
<b>Пример для тепловоза</b>			
1	Топливная система	1.1	Топливный бак (левый борт)
		1.2	Топливный бак (правый борт)
		1.3	Топливный бак (низ)
		1.4	Топливоподкачивающий насос
		1.5	Топливный насос высокого давления. Правый борт
		1.6	Топливные форсунки. Правый борт
		1.7	Подогреватель топлива
		1.8	Топливные форсунки. Левый борт
		1.9	Общее <sup>22</sup>
<b>Пример для тяговой подстанции</b>			
2	Измерительный трансформатор	2.1	Бак
		2.2	Релейная защита и автоматика выключателей
		2.3	Заземление трансформаторов
		2.4	Испытание заземления трансформатора
		2.5	Система обдува трансформаторов
		2.6	Трансформаторы
		2.7	Хроматографический анализ масла

Для каждой выделенной части узла/объекта эксперты формируют перечень пожароопасных неисправностей. При этом эксперты действуют следующим образом:

1. каждый специалист линейного уровня формирует первичный перечень неисправностей, основываясь на своем практическом опыте;
2. специалисты регионального уровня обобщают первичные перечни и выносят суждения о том, какие неисправности являются пожароопасными, дают предложения о расширении и формируют обобщенный перечень неисправностей;
3. специалисты центрального уровня рассматривают обобщенный перечень неисправностей с выводами специалистов регионального уровня и выносят конечное суждение о пожароопасности неисправности, при необходимости дают предложения по расширению перечня и формируют итоговый вариант – перечень типовых пожароопасных состояний.

Пример итогового перечня пожароопасных неисправностей для топливного бака тепловоза приведен в Таблице 3.8. Описанный выше порядок действий

<sup>22</sup> Для оценки состояния узла в целом, например «загрязненность», «коррозия» и т.п.

экспертов адаптируется под каждую группу экспертов с учетом характера отношений между ними.

Таблица 3.8 – Пример пожароопасных неисправностей

Часть узла	Пожароопасная неисправность
Топливный бак (Левый борт)	Наличие механических повреждений и трещин
	Наличие течи топлива из механических повреждений и трещин

### 3.2.5 Алгоритм классификации неисправностей объектов ЖДТ, влияющих на пожарный риск стационарных и передвижных объектов ЖДТ и формирования контрольно-оценочных карт

Сформированные в соответствии положениями 3.2.1 – 3.2.4 перечни пожароопасных неисправностей объектов ЖДТ должны быть приведены к виду, позволяющему использовать методы априорной оценки пожара (изложены в параграфе 2.4.2). Кроме этого, для обеспечения эффективности аудита пожарной опасности они должны быть сформулированы в виде, удобном для чтения аудитором, и обладать следующими свойствами:

- однозначность: формулировка неисправности должна однозначно определять узел или объект, к которому она относится;

- выявляемость в краткосрочный период: неисправность должна быть выявляема в ходе аудита объекта, т.е. без применения методов разрушающего контроля. Допускается включение в перечень неисправностей, для выявления которых необходимо применение средств диагностики, а также разбор узла. В этом случае продолжительность осмотра не должна превышать установленного аудиторами времени;

- интерпретируемость: неисправность должна быть способна подвержена статистической или экспертной интерпретации для установления значений переходных вероятностей или ранжирования видов ТО/ТР, на которых неисправность может быть выявлена. Статистическая интерпретируемость достигается за счет достаточного количества наблюдений.

На Рисунке 3.7 приведен алгоритм, позволяющий формировать перечни неисправностей объектов ЖДТ, таким образом, чтобы на их основе можно было бы применить методы априорной оценки вероятности пожара.

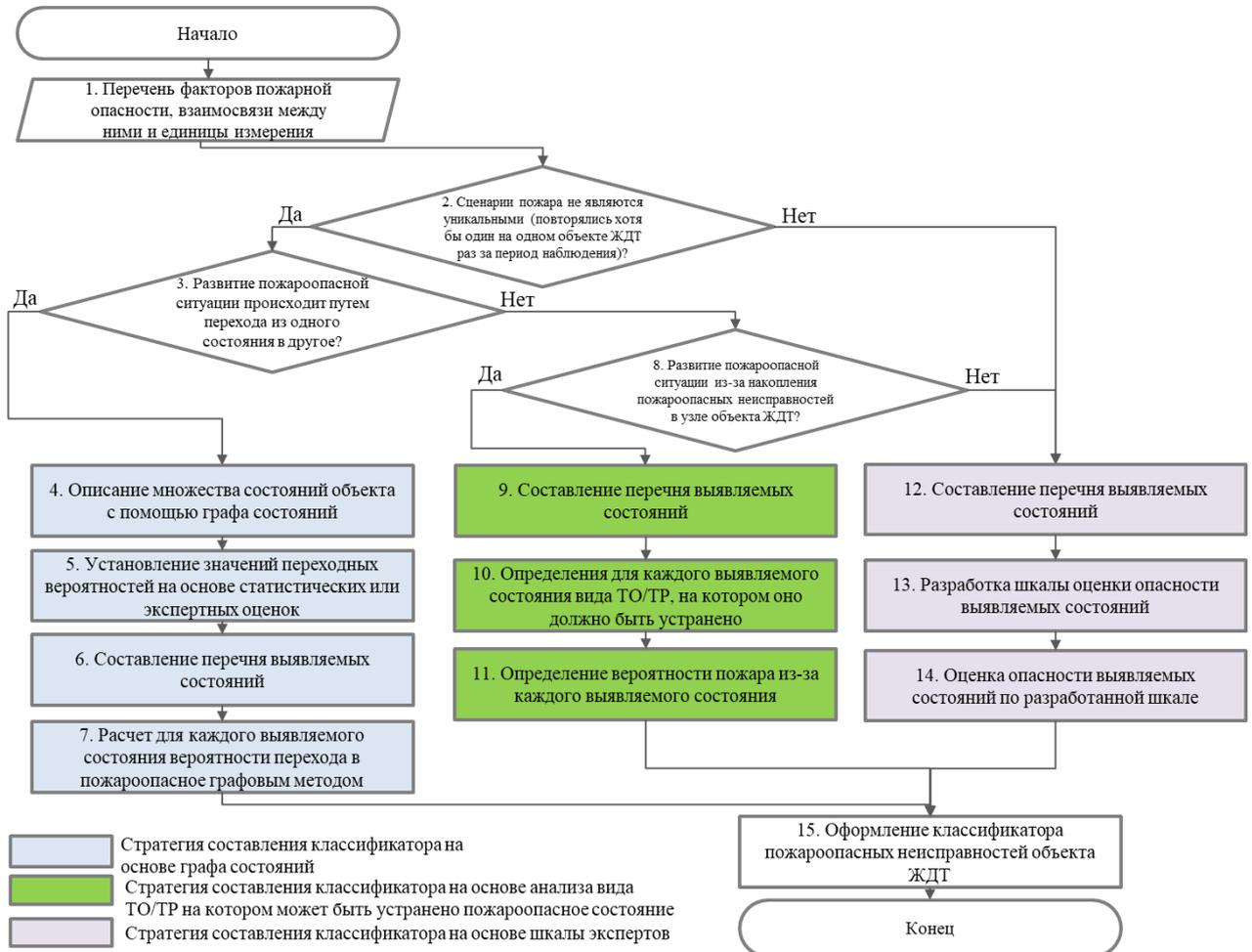


Рисунок 3.7 – Алгоритм формирования классификаторов неисправностей объектов ЖДТ для определения величины пожарного риска

Все сценарии появления пожара можно обобщить в четыре группы, в соответствии с которыми выделено три стратегии формирования классификатора пожароопасных неисправностей объектов ЖДТ:

— неоднократные сценарии возникновения пожара, развивающиеся путем перехода узла или оборудования объекта ЖДТ из одного состояния в другое. В этом случае для формирования классификатора пожароопасных неисправностей объектов ЖДТ применяется стратегия составления классификатора на основе

графа состояний (в соответствии с положениями параграфа 2.4.1.1) и реализуются шаги 1-7, 15 алгоритма, приведенного на Рисунке 3.7;

— неоднократные сценарии возникновения пожара, развивающиеся из-за накопления пожароопасных неисправностей в узле или оборудовании объекта ЖДТ. Для перехода от таких сценариев к классификатору используется стратегия, основанная на анализе видов ТО/ТР, на котором может быть устранена пожароопасная неисправность (в соответствии с положениями параграфа 2.4.1.2) и реализуются шаги 1, 2, 3, 8-11, 15 алгоритма, приведенного на Рисунке 3.7;

— неоднократные сценарии возникновения пожара, развивающиеся по неизвестным причинам. В случае, когда не удастся установить истинные причины развития пожароопасной ситуации или описать ее полностью по состояниям, которые можно идентифицировать в ходе аудита, применяется стратегия составления классификатора на основе шкалы экспертов, занимающихся формированием классификатора. В этом случае эксперты должны выбрать шкалу для оценки опасности состояний (балл, ранги и т.п.) и провести оценку каждого состояния (шаги 1, 2, 8, 12-15 алгоритма);

— однократные сценарии возникновения пожара. В этом случае из-за недостаточности статистических наблюдений также применяется стратегия составления классификатора на основе шкалы экспертов, занимающихся формированием классификатора, и реализуются шаги 1, 2, 12-15 алгоритма, приведенного на Рисунке 3.7.

В случае, когда применяется стратегия составления классификатора на основе шкалы экспертов, переход оценки вероятности возникновения пожара может быть осуществлен с помощью индексных методов оценки пожарных рисков или путем составления функций принадлежности нечеткому множеству «пожароопасная ситуация». Теория нечетких множеств для оценки как финансовых, так и технических рисков применяется для решения конкретных практических задач [114 – 118] и упоминается в данной работе, чтобы описать все возможные сценарии составления классификатора пожароопасных неисправностей объекта ЖДТ.

### 3.2.6 Этапы описания процессов, приводящих к снижению безопасности движения из-за возникновения и развития пожароопасных ситуаций на стационарных и передвижных объектах ЖДТ

На основании алгоритма выбора метода анализа данных (параграф 3.2.1), проведения анализа данных о случаях пожаров на объектах ЖДТ (параграф 2.3.1, 3.2.2, 3.2.3, 3.2.4), алгоритма классификации неисправностей объектов (параграф 2.3.5) целесообразно выделить процессы, которые могут быть выполнены только человеком, и те, которые могут быть автоматизированы. В Таблице 3.9 приведены этапы описания процессов, приводящих к снижению безопасности движения из-за возникновения и развития пожароопасных ситуаций на объектах ОАО «РЖД» с выводами о возможности автоматизации. Таблица 3.9 формировалась на основе того, что по результатам выполнения одного цикла анализа и оценки пожарной безопасности вручную были выявлены типовые состояния:

1. основные причины пожаров;
2. основные пожароопасные узлы, оборудование, технические средства;
3. основные пожароопасные события.

Таблица 3.9 – Этапы описания процессов, приводящих к снижению безопасности движения из-за возникновения и развития пожароопасных ситуаций

Этап	Процессы, которые могут быть выполнены только человеком <sup>23</sup>	Автоматизируемые процессы
Извлечение данных из первоисточников	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Формирование и актуализация перечня типовых состояний, упоминаемых в материалах разбора;</li> <li>• Структуризация данных.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Сбор данных об одном объекте из различных АСУ;</li> <li>• Распознавание соответствия документы типовому;</li> <li>• Распознавание содержания типового документа;</li> <li>• Распознавание печатного текста, частичная структуризация данных распознанного текста;</li> <li>• Поиск упоминания основных типовых состояний;</li> </ul>

<sup>23</sup> На момент проведения анализа

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Обнаружение материалов, в которых не упоминаются типовые состояния.</li> </ul>
Анализ наличия связей	Экспертный анализ.	Корреляционный анализ структурированных данных.
Определение типа данных (числовые и не числовые)	Анализ качества извлечения данных и формирование итоговых набор данных	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Извлечение из структурированных данных числовых данных;</li> <li>• Извлечение из структурированных данных текстовых данных.</li> </ul>
Качественный и полуколичественные методы анализа	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Построение диаграммы Исикавы;</li> <li>• Формирование выводов на основе анализа диаграммы Парето.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Анализ Парето по подготовленным данным;</li> <li>• Анализ частоты упоминания событий, узлов, фраз для построения диаграммы Исикавы.</li> </ul>
Кластерный анализ	Описание сценариев развития пожара.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Оценка расстояния между сценариями пожара;</li> <li>• Определение уровня схожести между сценариями;</li> <li>• Расчет мощности сценарий.</li> </ul>
Определение характера наблюдаемых данных	Подготовка данных для применения статистических критериев анализа	Применение критерия серий для проверки гипотезы о наличии тренда.
Статистический анализ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Подготовка данных для статистического анализа, в т.ч. выбор интервала времени наблюдения;</li> <li>• Формирование перечня узлов, объектов, на которых вероятно появление пожароопасных неисправностей</li> </ul>	Проверка статистических гипотез о законе распределения случайной величины, точечные и интервальные оценки вероятностей появления пожаров на объектах.
Анализ зависимостей	Подготовка данных для регрессионного анализа, задание критерия качества.	Построение регрессионной модели.
Формирование перечня факторов пожарной опасности	Выбор экспертов и организация их работы; фиксирование мнения экспертов.	Оценка согласованности экспертных мнений.
Выбор стратегии построения классификатора	Определение типа связей между состояниями.	Анализ частоты появления сценариев пожара.
Построение графа состояний объектов	Заполнение матрицы переходных вероятностей.	Визуализация графа на основании матрицы переходных вероятностей.
Экспертная оценка переходных вероятностей графа состояния объекта	Выбор экспертов и организация их работы; фиксирование мнения экспертов.	Оценка согласованности экспертных мнений.

Ежегодная реализация этапов описания процессов, приводящих к снижению безопасности движения из-за возникновения и развития пожароопасных ситуаций, позволит поддерживать в актуальном состоянии:

- перечень событий, приводящих к нарушению безопасности движения из-за пожаров;
- перечень пожароопасных неисправностей, которые могут быть исключены на этапе технического обслуживания и ремонта;
- сценарии появления пожара;
- графы состояний объектов.

### **3.3 Автоматизированная диагностика и управление состояниями объектов железнодорожного транспорта, влияющими на пожарную безопасность**

Автоматизированная диагностика и управление состояниями объектов железнодорожного транспорта, в соответствии с целью аудита пожарной безопасности (ПБ) объектов ЖДТ, сформулированной в параграфе 3.1, осуществляется в два этапа:

Этап 1: проведение автоматизированного аудита пожарной безопасности объекта ЖДТ и автоматизированное определение перечня состояний/нарушений требований пожарной безопасности (ТПБ), образующих недопустимый уровень риска;

Этап 2: управление состояниями объектов ЖДТ, для которых выявлены пожароопасные состояния/нарушения требований ТБП.

#### **3.3.1 Проведение автоматизированного аудита пожарной безопасности объекта ЖДТ и определение перечня состояний/нарушений ТПБ, образующих недопустимый уровень риска**

Для обеспечения полезности аудита (способности его результатов быть использованными для обеспечения пожарной безопасности) идентифицируемые состояния должны быть устраняемыми и ранжированными по степени влияния на вероятность пожара. Для обеспечения достоверности результатов аудита он должен проводиться группой специалистов, способных идентифицировать несоответствие состояния объекта требуемому и/или безопасному состоянию и заинтересованных выявить опасные состояния. При анализе состояния сложных технических систем экспертом, способным выявить пожароопасные состояния, должен выступать квалифицированный для работы с такой технической системой человек. Для обеспечения достоверности также необходима реализация процедур оценки согласованности мнения экспертов, которая характеризуется коэффициентом конкордации [119].

На основании результатов анализа пожарной безопасности на объектах ЖДТ для проведения автоматизированного аудита разработан способ автоматизированного диагностирования неисправностей объектов ЖДТ, приводящих к повышению уровня пожарного риска объектов ЖДТ (Рисунок. 3.7) [120], позволяющая на основе статистической информации о пожарах, возгораниях, нарушениях ТПБ на объектах ЖДТ формировать классификаторы для аудита объектов ЖДТ, КОК для диагностики объектов ЖДТ и фиксировать в них фактическое состояние объектов.

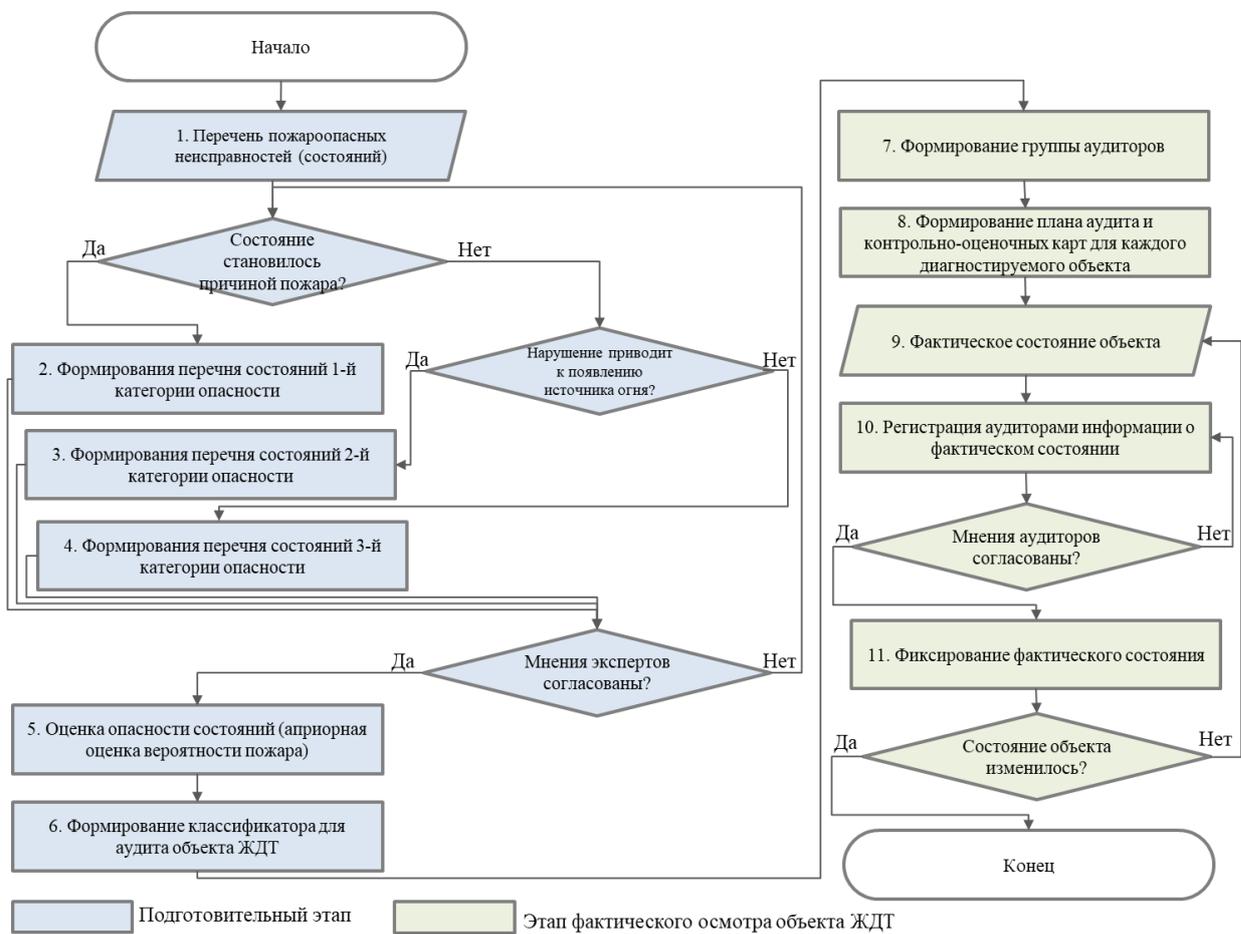


Рисунок 3.7 – Способ диагностирования неисправностей объектов ЖДТ, приводящих к пожарным рискам

Способ автоматизированного диагностирования неисправностей объектов ЖДТ (далее – способ) включает в себя следующую последовательность действий:

1. Анализ первоисточников о причинах пожара и результатов проверок МЧС:

— составление перечня нарушений ТПБ, выявленных при плановых проверках МЧС;

— составление перечня причин пожаров.

2. Формирование перечня типовых пожароопасных состояний:

— анализ статистики нарушений требований пожарной безопасности (ТПБ) и формирование перечня типовых нарушений;

— анализ причин пожаров и формирование перечня типовых пожароопасных состояний.

3. Ранжирование типовых пожароопасных состояний:

— формирование перечня пожароопасных состояний 1-й категории опасности (состояния, которые становились причинами пожара);

— формирование перечня пожароопасных состояний 2-й категории опасности (состояния, которые приводили к появлению причины пожара, или состояния объектов, которые по статистике были источниками огня);

— формирование перечня пожароопасных состояний 3-й категории опасности (прочие состояния).

4. Согласование мнения экспертов о результатах ранжирования пожароопасных состояний.

5. Количественная оценка опасности состояний всех категорий:

— для целей оценки вероятности появления пожара с помощью графового метода строится граф и матрица переходных вероятностей (в соответствии с параграфом 2.4.1.1);

— для оценки вероятности появления пожара на основе экспертного метода для каждого состояния оценивается вероятность появления пожароопасного события (в соответствии с параграфом 2.4.1.2).

6. Формирование классификатора неисправностей объектов ЖДТ для аудита пожарной безопасности объекта ЖДТ, в соответствии с алгоритмом,

приведенным на Рисунке 3.6. Классификатор содержит в себе перечень возможных состояний объекта ЖДТ (с учётом конфигурации объекта). В классификаторе при необходимости указываются инструменты, с помощью которых можно выявить пожароопасные состояния. На этом этапе также составляются типовые КОК.

7. Формирование группы аудиторов, квалифицированных для выявления состояния пожарной опасности на объекте ЖДТ.

8. Формирование плана аудита и контрольно-оценочных карт для каждого оцениваемого объекта. План аудита описывает последовательность осмотра объекта ЖДТ. КОК содержат в себе перечень пожароопасных неисправностей, которые могут наблюдаться на оцениваемом объекте. При этом КОК содержит поля для отметки наличия фактического состояния.

9. Осмотр объекта, выбор инструментов диагностики, сбор данных о фактическом состоянии.

10. Регистрация информации о фактическом состоянии.

11. Согласование мнения аудиторов о перечне выявленных пожароопасных состояний

12. Регистрация фактического состояния объекта.

13. Актуализация результатов аудита при изменении состояния объекта.

Предложенный способ реализуется в два этапа:

— Подготовительный этап (п. 1-6 способа) реализуется один раз для каждого типа объекта ЖДТ (серия локомотива, тип стационарного объекта).

— Этап фактического осмотра объекта ЖДТ (п. 7-13 способа).

Для реализации подготовительного этапа предложенного способа необходимы следующие ресурсы:

1. Эксперты, компетентные в расследовании причин пожара (для реализации п. 1-3 способа).

2. Электронный или бумажный носитель для регистрации экспертного мнения, проведения оценки согласованности мнения экспертов, количественной оценки опасности состояний (априорных вероятностей пожара) и формирования

классификатора для аудита объекта ЖДТ (в соответствии с положениями подраздела 2.4 исследования).

3. Специалисты для оценки согласованности мнения экспертов и априорных оценок вероятностей появления пожара.

Для реализации этапа фактического осмотра объекта ЖДТ необходимы:

1. Инструменты для проведения осмотра частей и узлов объекта ЖДТ.
2. Специалисты, компетентные в устройстве и эксплуатации объекта ЖДТ.
3. Электронный или бумажный носитель, позволяющий формировать КОК и регистрировать выявленные состояния.

### 3.3.2 Управление состояниями объектов ЖДТ, для которых выявлены пожароопасные состояния

Уровень априорного пожарного риска объектов определяется на основе рассчитанной по результатам аудита априорной вероятности появления пожара с помощью матрицы рисков, построенной в соответствии с положениями, изложенными в [79] или по шкале риска (параграф 2.4.2.3). На основе определенного уровня риска в соответствии с принципом *ALARP* формируется план мероприятий по управлению состоянием пожарной безопасности объекта защиты и принимается решение о запрете эксплуатации объекта.

В соответствии с принципом *ALARP* приемлемым считается риск, который настолько низкий, насколько затраты на его достижения являются экономически эффективными [121, 122]. Зоны *ALARP* представлены на Рисунке 3.8.

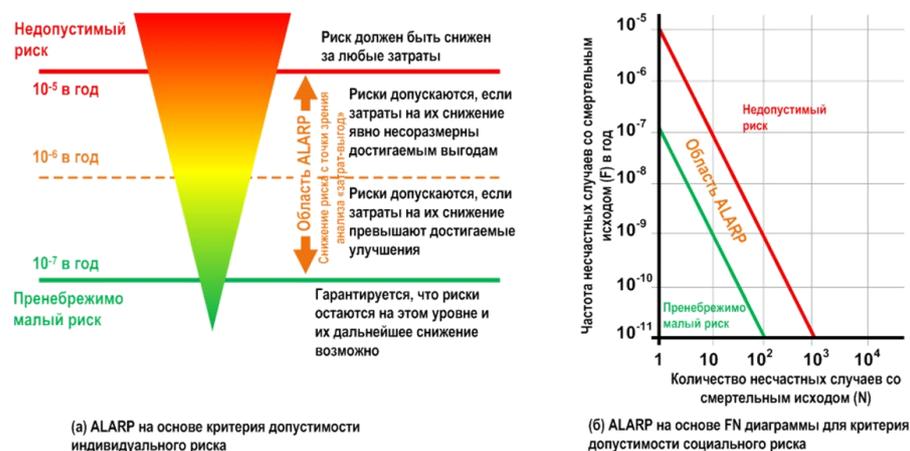


Рисунок 3.8 – Зона *ALARP*

Возможны две стратегии управления пожароопасными состояниями:

1. немедленное устранение состояний, образующих недопустимый уровень риска. Недопустимому уровню риска соответствуют события, при которых владелец объекта несет ущерб больший, чем он потратил бы на устранение состояний. Такие состояния устраняются на внеплановых ремонтах оборудования;

2. плановое устранение пожароопасных состояний, образующих допустимый уровень риска. К таким состояниям относятся нарушения требований пожарной безопасности по отношению к системе противопожарной защиты, единичные пожароопасные состояния, существование которых не приведёт, с некоторой вероятностью, к пожару до следующего цикла ремонтных работ.

Для обеспечения единого подхода к управлению техногенными рисками [86, 96] для управления пожарной безопасностью в ОАО «РЖД» сформулирована следующая последовательность планирования мероприятий по управлению пожарной безопасностью объектов ЖДТ на основании результатов оценки пожарных рисков (Рисунок 3.9):

1. на линейном уровне управления формируется перечень объектов, имеющих недопустимый уровень риска, и проводятся следующие работы:

— в случае, если структурное подразделение (СП) располагает ресурсами для проведения внепланового ремонта, пожароопасные состояния, образующие недопустимый уровень риска, устраняются на внеплановом ремонте;

— пожарный риск приводится к допустимому уровню за счет уменьшения уровня последствий с помощью систем обнаружения, тушения начавшегося пожара и эвакуации людей. Оценка влияния таких систем на уровень пожарного риска приведена в работе [42];

— в случае если СП не располагает ресурсами для устранения пожароопасных состояний, объект ЖДТ отстраняется до эксплуатации, формируются предложения в инвестиционный план, план капитального ремонта и реконструкции;

— информация об объемах и планах работ передается на региональный уровень управления.

2. На линейном уровне управления формируется перечень объектов, пожароопасные состояния которых допускается устранять на плановых видах технического обслуживания и ремонта, пересматриваются объемы работ, материальные запасы. Информация об объемах и планах работ передается на региональный уровень управления.

3. На региональном уровне управления осуществляются консолидация и анализ информации, полученной с линейного уровня. Формируются и передаются на центральный уровень управления инвестиционный план, план капитального ремонта и реконструкции.

4. На центральном уровне управления согласовываются и утверждаются инвестиционный план, план капитального ремонта и реконструкции, а также проводится анализ пожарной безопасности на сети железных дорог.

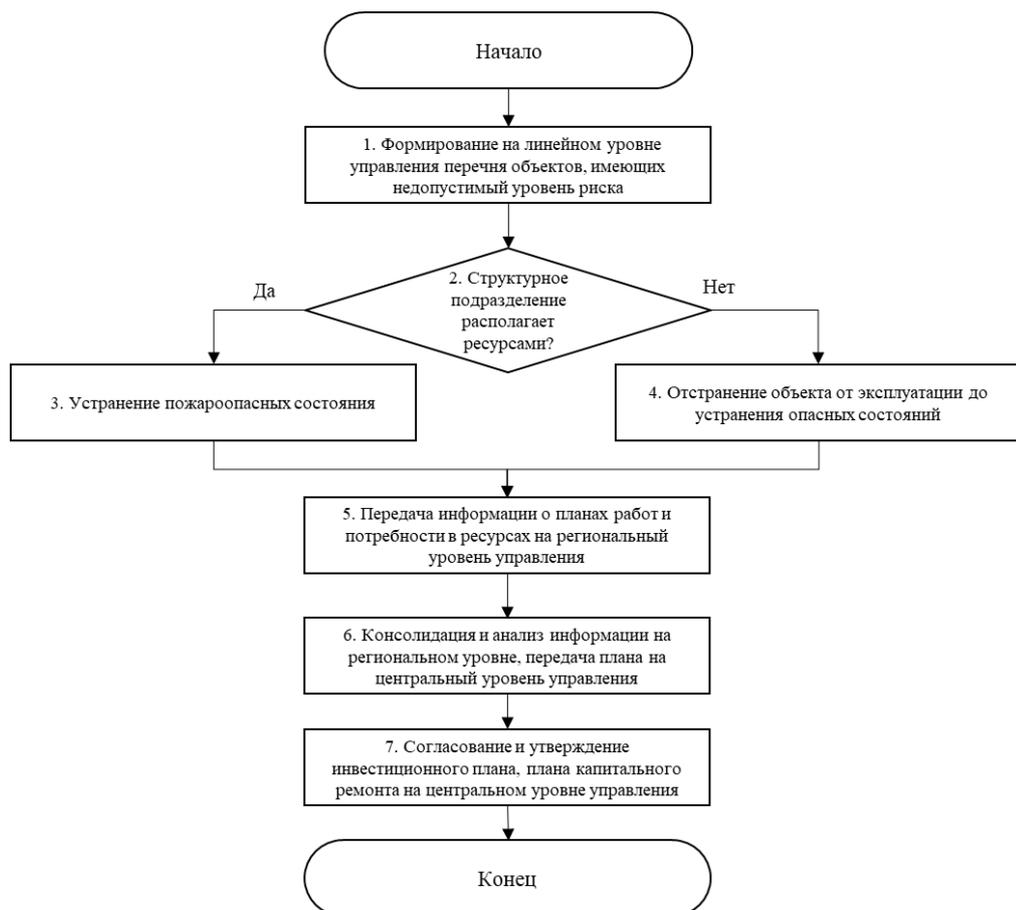


Рисунок 3.9 – Алгоритм планирования мероприятий по управлению пожарной безопасностью объектов ЖДТ на основании результатов оценки пожарных рисков

### **3.4 Автоматизация аудита пожарной безопасности стационарных и передвижных объектов железнодорожного транспорта**

#### **3.4.1 Назначение, функции автоматизированной системы аудита пожарной безопасности объектов железнодорожного транспорта**

Для автоматизации оценки пожарных рисков объектов инфраструктуры и подвижного состава на ЖДТ целесообразно использовать мобильные технологии, т.к. использование мобильного устройства способствует повышению достоверности вводимой информации за счет возможности ввода информации о состоянии объекта непосредственно после выявления состояния. Другое преимущество использования мобильных устройств – это увеличение скорости ввода информации.

Целью создания мобильного программно-аппаратного комплекса (МПАК) для аудита пожарной безопасности объектов ЖДТ является повышение эффективности деятельности по обеспечению пожарной безопасности на железнодорожных вокзалах за счёт своевременного выявления пожароопасных состояний и формирования перечня состояний, образующих недопустимый уровень пожарного риска.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

- автоматизация процесса сбора данных о пожароопасных состояниях на объектах ЖДТ;
- автоматизация процесса оценки пожарного риска, связанного с текущим состоянием объектов ЖДТ.

Критерии оценки достижения цели:

- повышение объективности оценки состояний пожарной опасности объектов ЖДТ;
- сокращение количества нарушений требований пожарной безопасности, образующих недопустимый уровень риска.

Для реализации поставленных задач в состав автоматизированной системы (АС) аудита пожарной безопасности объектов ЖДТ должны входить следующие модули мобильного инспектора:

- загрузки и выгрузки данных об объектах ЖДТ на мобильном устройстве;
- хранения данных об объектах ЖДТ на мобильном устройстве;
- ввода данных о динамических характеристиках объектов ЖДТ на мобильном устройстве;
- просмотра отчетов на мобильном устройстве;
- обновления классификаторов на мобильном устройстве.
- загрузки и выгрузки данных об объектах ЖДТ;
- хранения данных об объектах ЖДТ;
- ввода данных о стационарных характеристиках объектов ЖДТ (адрес, название);
- редактирования данных о динамических характеристиках объектов ЖДТ (названия, нумерация, названия, нумерация помещений, количество ПИО, фактическом состоянии ПИО);
- оценки уровня пожарного риска на железнодорожном вокзале с помощью матрицы риска;
- формирования и просмотра отчетов;
- ведения нормативно-справочной информации по объектам ЖДТ;
- администрирования.

Ввод данных о динамических характеристиках объекта ЖДТ на мобильном устройстве обеспечит возможность существенно сократить время проведения аудита, т.к. информация будет регистрироваться непосредственно при осмотре объекте. В этом случае исключается промежуточный носитель в виде бумаги или человеческой памяти, используемый при вводе данных на стационарный компьютер, удаленный от объекта осмотра. Необходимость осмотра группы объектов ЖДТ (локомотивов одной серии, постов ЭЦ и т.п.) накладывает определенные требования к системе организации и хранения данных. Становится

важным этап уникальной идентификации объекта ЖДТ и хранение результатов его аудита. Т.е. АС аудита пожарной безопасности объектов ЖДТ должна предусматривать хранение данных о нескольких объектах ЖДТ.

МПАК для аудита пожарной безопасности объектов ЖДТ обеспечивает аудитора возможностью системного и единообразного сбора данных о состоянии ПИО. Для этого модуль ввода данных о динамических характеристиках объекта ЖДТ должен позволять регистрировать информацию о фактическом состоянии потенциальных источников огня, а также факт устранения нарушения. Это обеспечит возможность оперативной актуализации информации об объектах ЖДТ.

Модуль формирования и просмотра отчётов должен учитывать сложность и составную структуру объекта аудита. Предлагается трёхуровневая система отчетности:

1) отчётность на уровне региональной дирекции:

- результаты оценок пожарных рисков объектов ЖДТ региональной дирекции;
- перечень потенциальных источников огня, состояние которых образует недопустимый уровень риска;
- перечень нарушений ТПБ;
- статистика устранения пожароопасных состояний и нарушений ТПБ;

2) отчетность на уровне объекта ЖДТ:

- матрица риска;
- сводная справка об уровнях потенциальных источников огня;
- сводная справка о нарушениях требований пожарной безопасности;

3) отчетность по элементам объекта ЖДТ (состав определяется непосредственно для каждой группы ЖДТ).

### **3.4.2 Принципы разработки и алгоритмы работы автоматизированной системы аудита пожарной безопасности объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ**

МПАК предназначен для априорной оценки пожарных рисков на линейном уровне управления пожарной безопасностью. Для реализации функций, описанных в параграфе 3.4.1 были разработаны алгоритмы МПАК для стационарных объектов ЖДТ и локомотивов. К стационарным объектам относятся объекты, представляющие собой здание или часть здания, строение или часть строения, прочно связанные фундаментом такого здания, строения с землей и подключенные (технологически присоединенные) к сетям инженерно-технического обеспечения. К ним относятся железнодорожные вокзалы, посты ЭЦ, тяговые подстанции. Условия эксплуатации стационарных объектов ЖДТ и локомотивов, а также способы обеспечения пожарной безопасности существенно отличаются [9, 123]. Необходимость различного алгоритмического и программного обеспечения автоматизированной диагностики состояний стационарных объектов и локомотивов вызвана следующими факторами:

1. невозможно составить полный перечень потенциальных источников огня (ПИО) стационарного объекта из-за их большого разнообразия и неопределенности пребывания на объекте. Нарушения ТПБ таких ПИО поддаются классификации (из-за единства требований к ним) и множество состояний стационарного объекта для априорной оценки вероятности появления пожара в соответствии с положениями, приведёнными в параграфе 2.4, может быть описано множеством различных комбинаций нарушений требований пожарной безопасности. В то же время потенциальными источниками огня локомотива являются его узлы, которые хорошо поддаются классификации, и каждый узел может быть описан конечным множеством его состояний. Автоматизированный учет конкретных пожароопасных состояний (а не нарушений, к которым приводит это состояние) позволяет оперативно планировать корректирующие мероприятия, и такая система является более предпочтительной, чем система фиксации нарушений ТПБ.

2. Количество стационарных объектов, эксплуатируемых структурным подразделением, является константой в течение 10 и более лет (на основе статистики), а количество приписанных к эксплуатационному депо локомотивов может меняться, что образует необходимость разработки функциональности корректировки перечня локомотивов, приписанных к структурному подразделению.

3. На пожарный риск стационарных объектов существенное влияние оказывают системы противопожарной защиты (СПЗ), которые позволяют локализовать пожар, затушить возгорание, организовать эвакуацию людей. При этом эффективность СПЗ и их влияние на риск оценивается можно оценить исходя из их соответствия установленным нормам [124].

МПАК для диагностирования и прогнозирования пожарных рисков на объектах ЖДТ, обеспечивающий оперативную оценку рисков как стационарных и передвижных объектов с учётом условий эксплуатации и без привлечения специалистов надзорных органов и внешних аудиторов, должен разрабатываться по принципам, приведенным в Таблице 3.10. Принципы, приведенные в Таблице 3.10, относятся к этапу проектирования программного обеспечения.

Таблица 3.10 – Принципы разработки МПАК и их цели

№	Принцип	Причина появления принципа	Цель
1	Принцип последовательности ввода данных. Согласно этому принципу, пользователь должен осуществлять ввод информации об объекте ЖДТ от общего к частному. При этом последовательность ввода данных должна соответствовать последовательности осмотра объекта ЖДТ.	Действия команды аудиторов должны быть организованы и направлены на последовательный осмотр всех ПИО таким образом, чтобы была исключена необходимость повторного посещения одного и того же пространства (комнаты, кабины и т.п.) где располагаются ПИО различных типов.	Обеспечить возможность эргономичного последовательного аудита всех ПИО (частей, оборудования, узлов объекта аудита).
2	Принцип минимальности действий пользователя заключается в отсутствии необходимости регистрации	Исправное состояние ПИО (частей, оборудования, узлов объекта аудита) является тривиальным.	Минимизировать количество действий пользователя и время аудита, обеспечивая

	исправного состояния объекта ЖДТ.		качество проведения аудита, за счет исключения повторяющихся действий и ошибочного ввода исправного состояния для неисправного объекта.
3	Принцип локальной индивидуализации, в соответствии с которым пользователю должна быть обеспечена возможность формирования КОК в соответствии с фактической конфигурацией объекта ЖДТ, а не полным перечнем потенциально возможно КОК.	Объекты ЖДТ одного функционального назначения имеют типовой набор ПИО, однако их количество от объекта к объекту отличается. Пользователь должен иметь доступ к глобальному каталогу КОК и классификаторов пожароопасных состояний, иметь возможность на их основе составлять КОКи и проводить аудит только тех ПИО, что присутствуют на контролируемом объекте.	Минимизировать количество времени, необходимого для проведения аудита.

Для реализации вышеуказанных принципов разработан алгоритм функционирования МПАК для стационарных объектов приведен на Рисунке 3.10, включающий в себя:

- блок ввода данных об объекте защиты<sup>24</sup> (объекте ЖДТ),
- блок расчета значений показателей, влияющих на уровень пожарного риска,
- блок определения уровня пожарного риска,
- блок принятия решения о декларировании объекта ЖДТ и допуска его к эксплуатации.

На Рисунке 3.11 приведен алгоритм функционирования мобильного устройства для автоматизированного диагностирования состояния локомотивов ОАО «РЖД». МПАК для локомотивов предназначен для оценки пожарных рисков локомотивов эксплуатационных депо (ТЧЭ) и предусматривает последовательный аудит всех локомотивов ТЧЭ (в соответствии алгоритмом на Рисунок 3.11).

<sup>24</sup> В соответствии с терминологией 123-ФЗ

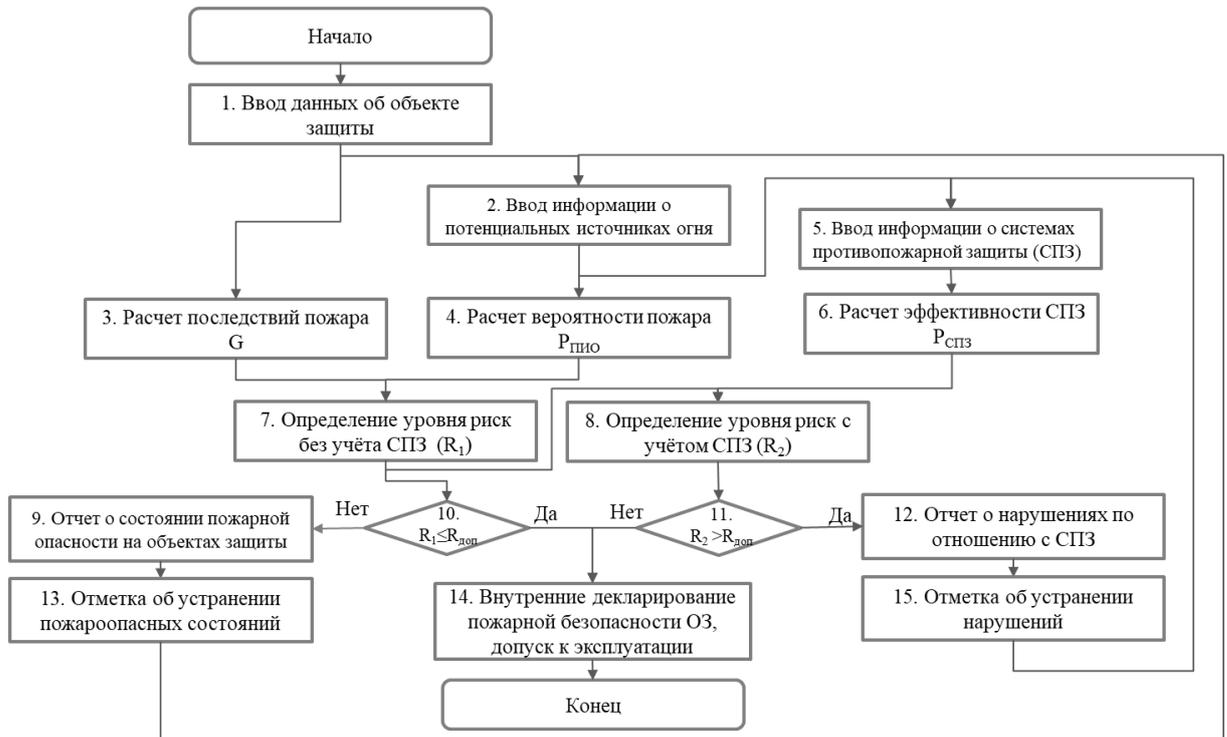


Рисунок – 3.10 Алгоритм функционирования МПАК для диагностирования состояния стационарного объекта ОАО «РЖД»

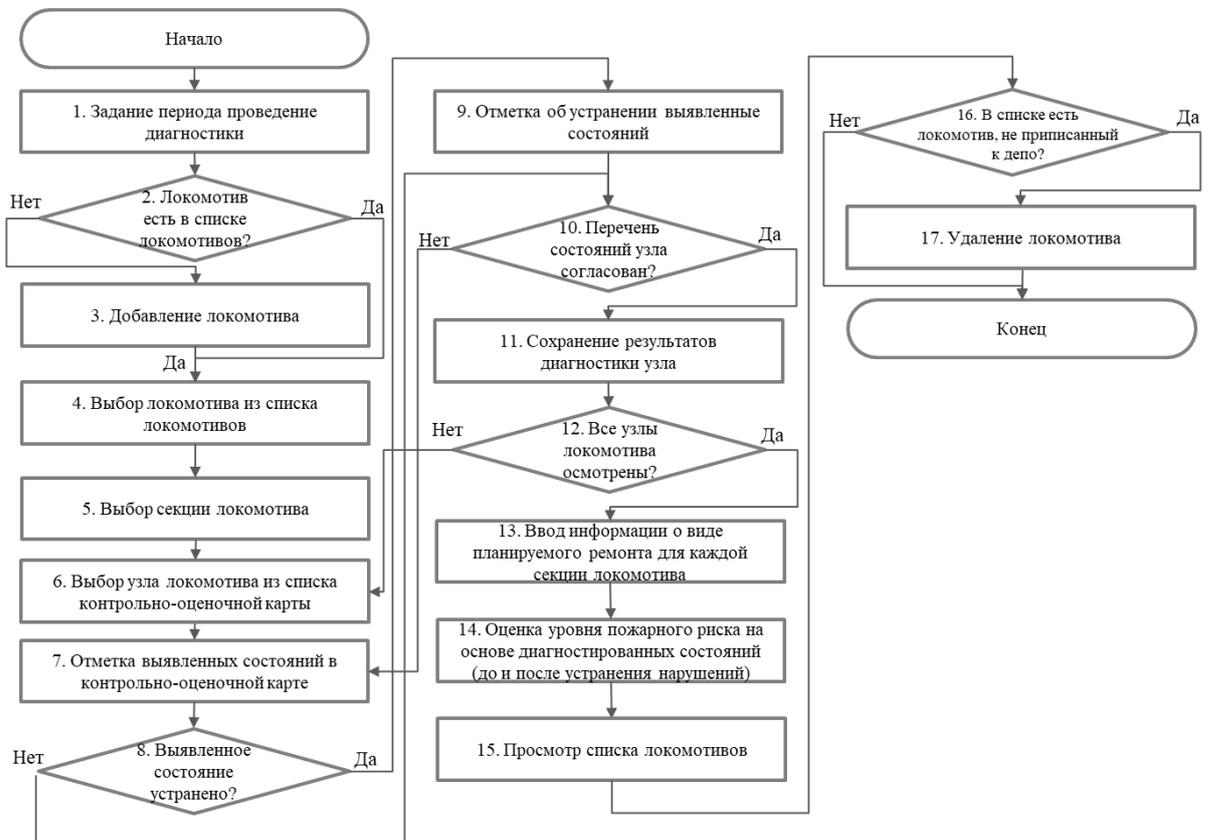


Рисунок 3.11 – Алгоритм функционирования МПАК для диагностирования состояния локомотива ОАО «РЖД»

В отличие от стационарных объектов ЖДТ, для локомотивов строго определены периоды проведения оценки состояния пожарной безопасности: весенний и осенний комиссионные осмотры [9]<sup>25</sup>. Т.к. стационарный объект ЖДТ не меняет свое местоположение, то фактически провести аудит пожарной безопасности можно в любое необходимое время, и в МПАК регистрируется время проведения аудита. Для локомотивов же необходимо заранее планировать (задавать) период проведения аудита пожарной безопасности.

Для системного планирования мероприятий по устранению нарушений требований пожарной безопасности на стационарных объектах ЖДТ и локомотивов необходимо аккумулировать и анализировать результаты их автоматизированной диагностики и оценки рисков в центре контроля пожарной безопасности. Для этого необходимо взаимодействие систем корпоративного уровня с мобильными устройствами автоматизированной диагностики.

Способ определения пожарной опасности и технических средств объектов железнодорожного транспорта и система реализации (АС ДиППБ) были запатентованы, патент RU 2 674 216 C1 (заявка опубликована 2018.12.05) [102]. АС ДиППБ содержит центр контроля пожарной безопасности (на центральном уровне управления ОАО «РЖД») и МПАК, используемый при проведении аудита пожарных рисков [102, 120]. В центре контроля пожарной безопасности осуществляется формирование классификаторов для аудита объектов ЖДТ по алгоритмам, описанным в параграфе 3.3.1, рисунки 3.10, 3.11, а также апостериорная оценка пожарного риска объектов ЖДТ (в соответствии с подразделом 2.3).

Количество используемых МПАК определяется эксплуатирующими организациями. Каждый МПАК работает автономно и может быть использован в условиях отсутствия связи с центром контроля пожарной безопасности. В МПАК реализуются алгоритмы расчета пожарных рисков для объектов ЖДТ, приведенные на Рисунках 3.10 и 3.11.

---

<sup>25</sup> Стационарные объекты ЖДТ также проходят комиссионные осмотры, однако помимо них существуют план проверок МЧС и другие планы, влияющие на периодичность аудита.

После расчета пожарного риска на основании внесенных в МПАК данных о состояниях пожарной опасности разрабатывается план устранения выявленных состояний с учётом уровня риска, которые они образуют. В случае если объект ЖДТ допускается к эксплуатации с ограничениями, то устранение пожароопасных состояний осуществляется в рамках планового технического обслуживания и ремонта. Если объект не допускается к эксплуатации, то осуществляется внеплановый ремонт.

При взаимодействии систем корпоративного уровня (СКУ) с мобильными устройствами (МУ) автоматизированной диагностики могут возникать логические конфликты, связанные с тем, что в СКУ уже может быть информация о результатах диагностики объектов. При загрузке данных с мобильного устройства в СКУ могут возникать следующие конфликты: в СКУ уже есть результаты аудита пожарной безопасности локомотива; состав секций локомотива в СКУ и на МУ отличаются.

Алгоритм разрешения таких конфликтов приведен на Рисунке 3.13. Алгоритм разрешения конфликтов реализуется при передаче данных из МПАК в СКУ (центр контроля пожарной безопасности объектов). В случае отсутствия конфликтов данные с МПАК загружаются в базу СКУ. При обнаружении конфликтов пользователю СКУ выводятся диалоговые окна с предложениями вариантов разрешения конфликтов. Таким образом решается задача минимизации ошибок.

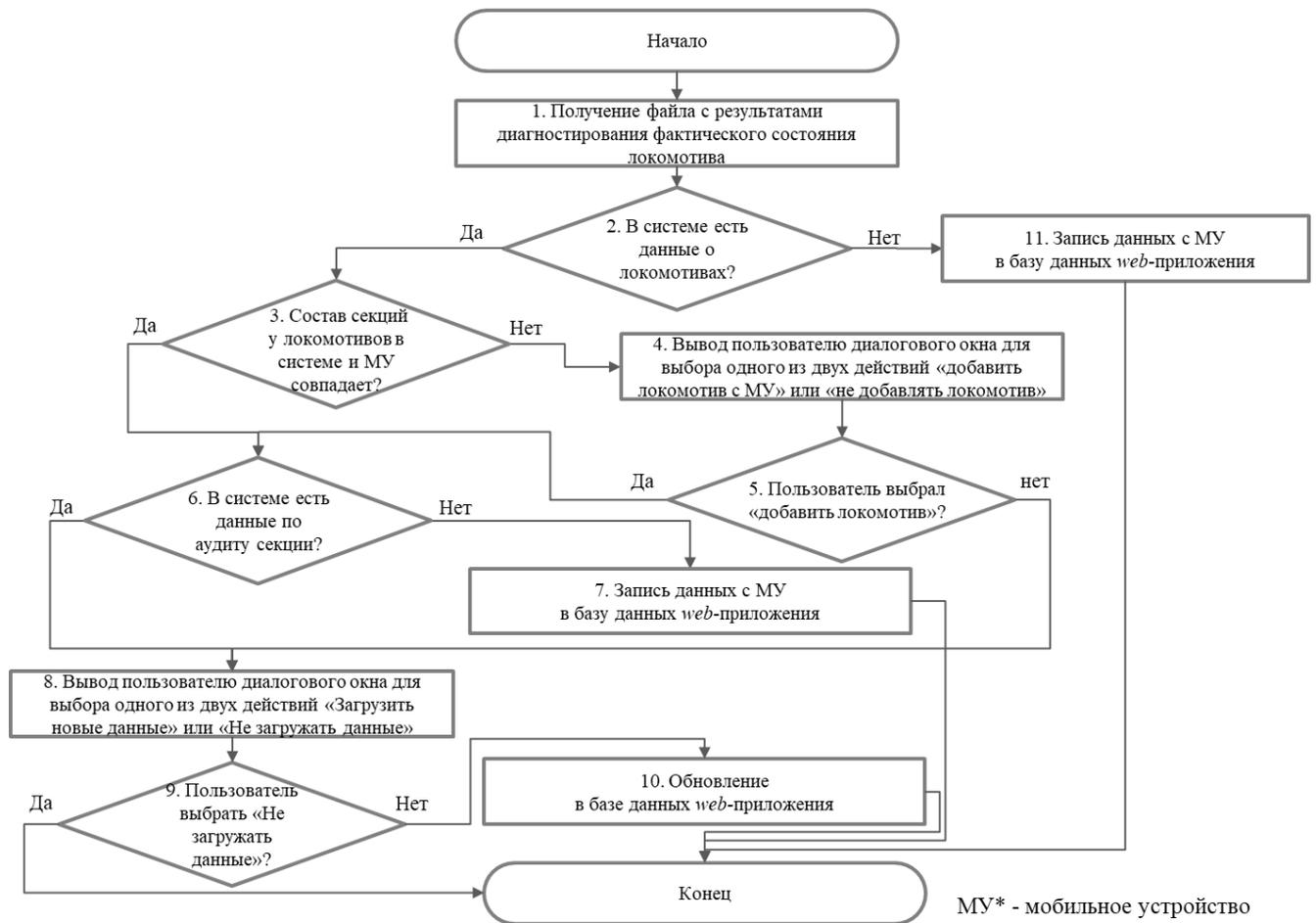


Рисунок 3.13 – Алгоритм разрешения конфликтов при загрузке данных с мобильного устройства в систему корпоративного уровня

### **Выводы по главе 3**

1. В качестве инструмента аудита состояний объектов ЖДТ, приводящих к снижению безопасности движения, предложено применение проверочных листов (КОК) для выявления пожароопасных неисправностей с привлечением сотрудников объекта ЖДТ к процессу их заполнения. Такой метод обеспечивает возможность передавать, хранить и отслеживать изменение информации. Вовлечение сотрудников объекта ЖДТ в проверку позволит значительно сократить трудовые и временные ресурсы на проведение аудита, что позволит сделать его систематическим.

2. Разработан алгоритм выбора метода анализа данных о состояниях объектов ЖДТ (для целей формирования критериев аудита пожарной безопасности) с учётом характера извлекаемых из первоисточников данных. Определена последовательность применения количественных и полуколичественных методов анализа для формирования перечня факторов пожарной опасности объектов ЖДТ, описания взаимосвязи этих факторов друг с другом. Предложен метод использования кластерного анализа нечисловых статистических данных для описания сценариев пожара. Осуществлена формализация процесса описания последовательности событий, приводящих к пожару с помощью частично-упорядоченных множеств. Для формирования типовых последовательностей событий предложен способ оценки близости подмножеств на основе расчёта расстояния Хэмминга – числа позиций, при которых события (символы) не совпадают.

3. Предложен метод автоматизированного описания процессов, приводящих к снижению безопасности движения из-за возникновения и развития пожароопасных ситуаций на стационарных и передвижных объектах ЖДТ, применение которого обеспечивает возможность поддержания в актуальном состоянии классификаторов пожароопасных неисправностей, сценариев появления пожара и перечней пожароопасных объектов.

4. Предложена система оценки пожарного риска объектов ЖДТ, включающая на центральном уровне управления пожарной безопасностью ОАО «РЖД» центр

контроля пожарной безопасностью. В этом центре осуществляется формирование классификаторов нарушений требований пожарной безопасности и контрольно-оценочных карт для проведения аудита. Для линейного и регионального уровня управления пожарной безопасностью разработаны алгоритмы диагностирования и документирования пожароопасных состояний подвижных и стационарных объектов ЖДТ. Программно-аппаратная реализация этих алгоритмов в виде мобильного программно-аппаратного комплекса позволяет непосредственно на объектах ЖДТ оперативно осуществлять автоматизированный аудит пожарной безопасности.

## ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ

### 4.1 Оценка пожарных рисков на стационарных объектах ОАО «РЖД»

На основании статистики количества и последствий пожара, а также возможных последствий выделены 4 группы стационарных объектов ЖДТ, имеющих особый приоритет с точки зрения обеспечения пожарной безопасности: железнодорожные вокзалы (объекты с массовым пребыванием людей), посты ЭЦ (пожар приводит к приостановке автоматической централизации на железнодорожных путях), тяговые подстанции (пожар приводит к приостановке электроснабжения), информационно-вычислительные центры (возможна приостановка коммуникации и обмена данных на сети железных дорог). Для этих объектов разработаны и утверждены в ОАО «РЖД» методики оценки пожарных рисков:

— Методика оценки пожарных рисков на железнодорожных вокзалах ОАО «РЖД» (утв. в ОАО «РЖД» 9 декабря 2013 г.);

— Методика оценки пожарных рисков в информационно-вычислительных центрах ОАО «РЖД» и классификатора нарушения требований пожарной безопасности (утв. Распоряжением ОАО «РЖД» 20 декабря 2017 г. №2665р);

— Методика расчета пожарного риска на постах электрической централизации, диспетчерской централизации, горочной автоматической централизации (утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 4 августа 2017 г. №1558р);

— Методика проведения анализа противопожарного состояния тяговых подстанций в Трансэнерго – филиале ОАО «РЖД» (утв. Распоряжением Директора Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД» 12 января 2018 г. № ТЭ-2/р);

#### 4.1.1 Апостериорная оценка пожарных рисков на стационарных объектах

Апостериорная оценка пожарных рисков стационарных объектов осуществляется на основе расчета вероятности появления  $k$  пожаров  $P(k \neq 0)$  и последствий пожаров. Причем для вокзалов и информационно-вычислительных центров последствия пожаров оцениваются в минимальных размерах оплаты труда

(МРОТ), т.к. пожары сопряжены с материальными потерями. Для постов ЭЦ уровень последствий оценивается на основе классификации и специализации железнодорожных линии, на которой может быть совершена остановка движения из-за пожара на посту ЭЦ. Тяговые подстанции (ТП) имеют высокий уровень износа основных фондов и резервирование процессов электроснабжения, поэтому при расчете риска пожара нецелесообразно оценивать материальные потери (амортизированной стоимостью поврежденного оборудования можно пренебречь, а расчёт стоимости нового оборудования трудоемок), и перерывы в движении поездов. В виду этого риск для ТП оценивается на основе  $P(k \neq 0)$  по шкале риска. Матрицы и шкала пожарных рисков стационарных объектов ЖДТ приведены в Приложении Б.

На всех стационарных объектах за период наблюдения (с 2011 по 2017 гг.) не было допущено пожаров, на которых был бы причинен вред пассажирам или сотрудникам ОАО «РЖД». Апостериорная оценка индивидуальных пожарных рисков во всех региональных дирекциях допустимая, т.е. дирекции не имеют отличий и приоритетов с точки зрения необходимости повышения уровня пожарной безопасности.

Апостериорная оценка пожарных рисков, с учётом приведенных выше последствий, позволяет выделить ряд региональных дирекций, для которых необходимо проведение работ по повышению пожарной безопасности.

По результатам оценки апостериорного риска пожаров вокзалов выделены две группы региональных дирекций Дирекции железнодорожных вокзалов (ДЖВ). В первую группу вошли региональные дирекции, выборочная вероятность пожаров на которых составила<sup>26</sup>  $10^{-3} < P(k \neq 0) < 7,5 \cdot 10^{-2}$ : Октябрьская, Восточно-Сибирская, Горьковская, Забайкальская, Куйбышевская, Московская, Свердловская, Северо-Кавказская, Южно-Уральская. В региональных дирекциях второй группы не было допущено пожаров: Дальневосточная, Западно-Сибирская, Красноярская, Приволжская, Северная, Юго-Восточная, Калининградская.

---

<sup>26</sup> Интервал значение вероятности определен экспертной группой ОАО «РЖД»

В зоне допустимого риска (по матрице риска, Рисунок Б.5 Приложения Б) по статистике пожаров на постах ЭЦ оказались региональные дирекции: Калининградская, Дальневосточная, Забайкальская, Куйбышевская, Красноярская, Северо-Кавказская, Юго-Восточная, Южно-Уральская. В зоне нежелательного риска: Октябрьская, Московская, Северная, Восточно-Сибирская, Горьковская, Свердловская.

Пожары на ТП являются более редкими событиями, чем пожары на вокзалах, для них вероятность пожара оценивается только на центральном уровне управления (объединение региональных дирекций). Частота пожаров на ТП составила  $1,4 \cdot 10^{-3}$  пожаров/(год· $N_{ТП}$ ), что соответствует нежелательному уровню риска.

#### **4.1.2 Классификатор нарушений требований пожарной безопасности и пожароопасных состояний на стационарных объектах ЖДТ**

Классификация нарушений требования пожарной безопасности и пожароопасных состояний стационарных объектов осуществлялась исходя из анализа особенностей развития пожароопасных ситуаций и причин пожаров (методы анализа изложены в Главе 3). Выбрано два подхода к классификации: процессный и объектный. Процессный подход применяется для объектов, на которых оказываются типовой набор услуг, но набор оборудования для оказания этих услуг от объекта к объекту отличается. Такими объектами являются железнодорожные вокзалы и ИВЦ. Примеры классификаторов приведены в Приложении В, Таблицах В.1 и В.2.

Объектный подход к классификации применен для объектов с типовым перечнем оборудования, которое может стать потенциальным источником огня или способствует уменьшению вероятности успешного тушения и эвакуации людей в случае пожара. По этому принципу проводилась классификация нарушений требований пожарной безопасности для постов ЭЦ и ТП. Примеры классификаторов приведены в Приложении В, Таблицах В.3-В.5.

#### 4.1.2.1 Классификаторы нарушений требований пожарной безопасности и пожароопасных состояний железнодорожных вокзалов и информационно-вычислительных центров

Для железнодорожных вокзалов и информационно-вычислительных центров на основании приведенных анализов (в соответствии с положениями подраздела 3.2) по признаку участия оборудования в производственном процессе выделено 3 группы потенциальных источников огня: производственный процесс, вспомогательный процесс, инфраструктура (инженерное обеспечение). Для каждого процесса сформирован классификатор нарушений требований пожарной безопасности. При этом каждое нарушение имеет несколько классификационных признаков. Структура классификации приведена в Таблице 4.1. Классификатор нарушений требований пожарной безопасности по отношению к конструкции технологического оборудования, реализующего производственный процесс на железнодорожном вокзале, приведен в Приложении В, Таблице В.1.

Таблица 4.1 - Классификационные признаки нарушений требований пожарной безопасности на железнодорожном вокзале (пример)

Тип	Класс	Вид
Производственный процесс	Технологическое оборудование	Конструкция
		Монтаж/установка
		Условия эксплуатации
		Технологический процесс
	Действие людей по отношению к технологическому оборудованию	Действие людей по отношению к технологическому оборудованию
	Технологическая среда	Технологическая среда
	Действие людей по отношению к технологической среде	Действие людей по отношению к технологической среде

#### 4.1.2.2 Классификаторы нарушений требований пожарной безопасности и пожароопасных состояний постов электрической централизации и тяговых подстанций

Для постов ЭЦ выделено 24 группы типовых объектов и 84 типовых объекта. Каждый объект имеет классификационные признаки вида объекта: потенциальный источник огня или объект системы обеспечения пожарной безопасности и тип объекта (Таблица 4.2). В Приложении В, в Таблицах В.3-В.4 приведен перечень объектов аудита поста ЭЦ и пример КОК. Каждому пожароопасному состоянию экспертами поставлен в соответствие балл опасности от 0 до 5, характеризующий частоту возникновения инициирующего события (0 – вероятность возникновения инициирующего воздействия 0,0001 (в год), 5 – инициирующее воздействие является частью технологического процесса, реализуемого техническим средством, и возникает каждый день (изменение режимов работы, включение/выключение и др.), подробнее в Приложении В, Таблица В.6).

Таблица 4.2 – Виды и типы объектов проведения аудита, влияющих на пожарный риск поста ЭЦ

Вид объекта, влияющего на пожарный риск	Тип объекта, влияющего на пожарный риск
Потенциальный источник огня (ПИО)	Технические средства (ТС)
	Применяемые вещества и материалы (ВиМ)
	Системы инженерного обеспечения (СИО)
Объекты системы обеспечения пожарной безопасности (СОПБ)	Объекты системы предотвращения пожара (СПП)
	Объекты системы противопожарной защиты (СПЗ)
	Организационно-распорядительные документы и техническая документация (ОТД)

Для ТП выделено 2 группы объектов (ПИО и объекты СОПБ). 39 типовых объектов относятся к группе ПИО и 9 типовых объектов СОПБ. Пример КОК ПИО ТП приведен в Приложении В, Таблица В.5. В Таблице В.5 приняты следующие сокращения:

—  $P_{ij}$  – вероятность появления отказа из-за  $j$ -го состояния  $i$ -го элемента, узла объекта, условий его эксплуатации или технического обслуживания;

—  $\alpha_i$  – вероятность появления пожароопасного отказа из-за состояния  $i$ -го элемента, узла объекта, условий его эксплуатации или технического обслуживания.

Пример построения графа состояний для оценки вероятности появления пожароопасного состояния приведен в Приложении Г.

### **4.1.3 Априорная оценка вероятности пожароопасного события из-за нарушений требований пожарной безопасности и пожароопасных состояний на стационарных объектах ЖДТ**

#### **4.1.3.1 Априорная оценка вероятности пожароопасного события из-за нарушений требований пожарной безопасности на железнодорожных вокзалах и в информационно-вычислительных центрах**

Для каждого  $i$ -го пожароопасного состояния объекта ЖДТ (нарушения ТПБ) по способу оценки априорной вероятности, приведенном в параграфе 2.4, оценена вероятность появления  $p_i$  пожароопасной ситуации. При этом, если нарушения ТПБ касались одного объекта, то для таких нарушений строился общий граф состояний пожарной безопасности. Если нарушение ТПБ приводит к нескольким возможным опасным событиям, то в КОК включалась оценка наиболее вероятного события. На основании выявленных нарушений для каждого потенциального источника огня рассчитывается вероятность появления пожара по формуле:

$$P_{\text{пожар}} = P_{\text{р}}^{\text{огня}} * P_0 * \nu, \quad (30)$$

где  $P_0$  - возможность возникновения очага огня;

$P_{\text{р}}^{\text{огня}}$  - возможность распространения огня по пожарному отсеку (рассчитывается на основании количества пожарной нагрузки в помещении);

$\nu$  - частота перехода возгорания в пожар.

Для каждого ПИО, находящегося в пожарном отсеке, определяется возможность возникновения очага огня  $P_0$  по следующей формуле:

$$P_0 = m_{\text{р}_{\text{нсі}}} * P_{\text{нс}} + m_{\text{р}_{\text{нді}}} * P_{\text{нд}}, \quad (31)$$

где  $m_{\text{р}_{\text{нсі}}}$  и  $m_{\text{р}_{\text{нді}}}$  – весовые коэффициенты факторов, характеризующие степень влияния нарушений требований пожарной безопасности на количество пожаров для некоторого  $i$ -го типа помещения на железнодорожном вокзале;

$P_{нс}$  – возможность возникновения очага огня, вызванная несоответствием состояния потенциальных источников пожара требованиям пожарной безопасности (рассчитывается на основании значения  $p_i$  фактически выявленных нарушений ТПБ, пример значений в Приложении В, Таблица В.1);

$P_{нд}$  – возможность возникновения очага огня, вызванная несоответствием действий персонала по отношению к потенциальному очагу огня требованиям пожарной безопасности (рассчитывается на основании значения  $p_i$  фактически выявленных нарушений ТПБ, значение определяется аналогично  $P_{нс}$ ).

На основании рассчитанного значения  $P_{пожар}$  и последствий от пожара (рассчитывается на основе статистики с учётом функционального назначения помещения с наибольшей вероятностью пожара) по матрице рисков определяется уровень пожарного риска вокзала на основе априорной оценки.

#### **4.1.3.2 Априорная оценка вероятности пожароопасного события из-за нарушений требований пожарной безопасности на тяговых подстанциях и постах электрической централизации**

Для каждого  $i$ -го объекта тяговой подстанции на основании способа априорной оценки вероятности перехода в опасное состояние (Глава 2, п. 2.4.1.1) вероятность  $P_{ij}$  появления отказа из-за за  $j$ -го состояния  $i$ -го элемента (примеры графов состояния приведены в Приложении А) и на основании статистики отказов оценена вероятность  $\alpha_i$  появления пожароопасного отказа.  $P_{пожi}$  – вероятность появления пожара из-за состояния элемента,  $i$ -го узла  $k$ -го объекта, условий его эксплуатации и технического обслуживания, рассчитывают по формуле:

$$P_{пожi} = \alpha_i \cdot \sum_{j=1}^N (P_{ij} \cdot I_{ij}), \quad (32)$$

где  $I_{ij}$  – индикаторная функция.  $I_{ij}=1$ , если присутствует  $j$ -е пожароопасное состояние для  $i$ -го элемента, узла объекта, условий его эксплуатации и технического обслуживания и  $I_{ij}=0$  в противном случае.

Вероятность пожара на тяговой подстанции рассчитывается по формуле:

$$P_{ТП}^{пож} = k_{СОПБ} \cdot \max\{P_{пожi}\}, \quad (33)$$

где  $k_{СОПБ}$  – коэффициента снижения возможности возникновения пожара за счет наличия СОПБ (СПЗ, противопожарный режим и т.д.).

Вероятность пожара на посту ЭЦ оценивается по совокупной характеристике всех объектов поста ЭЦ, т.к. они реализуют единый непрерывный производственный процесс. Появление опасного события на одном объекте запускает цепь событий в объектах, связанных с ним.

Расчет возможности возникновения пожара на посту ЭЦ ( $P_{\text{общ}}^{\text{пож}}$ ) рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{общ}}^{\text{пож}} = (\max\{P_A; P_{\text{п}}\}) \cdot K_{\text{сопб общ}}, \quad (34)$$

где  $P_A$  – возможность появления иницирующего пожароопасного воздействия, влияющего на пожароопасное состояние, рассчитывается по формуле:

$$P_A = \max\{\alpha_A; \beta_A; \gamma_A\}, \quad (35)$$

где  $\alpha_A$  – коэффициент опасности объектов, имеющих 3-5 баллов активной опасности, определяется по сводной Таблице о состоянии объектов осмотра общего назначения поста ЭЦ и Таблице 4.3;

$\beta_A$  – коэффициент опасности объектов, имеющих 2-3 баллов активной опасности, определяется по сводной Таблице о состоянии объектов осмотра общего назначения поста ЭЦ и Таблице 4.3;

$\gamma_A$  – коэффициент опасности объектов, имеющих менее 2 баллов активной опасности, определяется по сводной Таблице о состоянии объектов осмотра общего назначения поста ЭЦ и Таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Значения коэффициентов активной опасности

Доля позиций, имеющих количество баллов	Значение коэффициентов		
	$\alpha_A$ , 4-5 баллов	$\beta_A$ , 2-3 баллов	$\gamma_A$ , менее 2 баллов
1	2	3	4
100%	0,5	0,05	0,005
81% - 99%	0,28	0,027	0,00026
61% - 80 %	0,006	0,0016	0,0003
41-60 %	0,0016	0,0002	0,000016
21-40 %	0,0002	0,00004	0,000008
От 1 до 20 %	0,00001	0,000006	0,0000004
0 %	$10^{-8}$	$10^{-8}$	$10^{-8}$

$P_{\text{п}}$  – возможность того, что в момент появления иницирующего пожароопасного воздействия в помещении произойдет пожар.  $P_{\text{п}}$  рассчитывается по формуле.

$$P_{\Pi} = \max \{\alpha_{\Pi}; \beta_{\Pi}; \gamma_{\Pi}\}, \quad (36)$$

где  $\alpha_{\Pi}$  – коэффициент опасности объектов, имеющих 3-5 баллов пассивной опасности, определяется по сводной Таблице о состоянии объектов осмотра общего назначения поста ЭЦ и Таблице 4.4;

$\beta_{\Pi}$  – коэффициент опасности объектов, имеющих 2-3 баллов пассивной опасности, определяется по сводной Таблице о состоянии объектов осмотра общего назначения поста ЭЦ и Таблице и 4.4;

$\gamma_{\Pi}$  – коэффициент опасности объектов, имеющих менее 2 баллов пассивной опасности, определяется по сводной Таблице о состоянии объектов осмотра общего назначения поста ЭЦ и Таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Значения коэффициентов пассивной опасности

Доля позиций, имеющих количество баллов	Значение коэффициентов		
	$\alpha_{\Pi}$ 3-5 баллов	$\beta_{\Pi}$ 2-3 баллов	$\gamma_{\Pi}$ менее 2 баллов
1	2	3	4
100%	0,5	0,05	0,005
81-99%	0,28	0,027	0,00026
61-80%	0,006	0,0016	0,0003
41-60%	0,0016	0,0002	0,000016
21-40%	0,0002	0,00004	0,000008
1-20%	0,00001	0,000006	0,0000004
0%	$10^{-8}$	$10^{-8}$	$10^{-8}$

$K_{\text{СОПБ ОБЦ}}$  – коэффициент снижения возможности возникновения пожара за счет эффективности работы СОПБ.

#### **4.1.4 Аудит пожарной безопасности стационарных объектов ЖДТ и результаты оценки пожарных рисков**

##### **4.1.4.1 Аудит пожарной безопасности железнодорожных вокзалов и результаты оценки пожарных рисков**

При проведении аудита оцениваются: пожарная нагрузка в помещении (пожарном отсеке), потенциальные источники огня, средства и системы противопожарной защиты, знания/действия людей (в области пожарной безопасности). По результатам аудита 43 вокзалов Западно-Сибирской региональной дирекции вокзалов выявлено 10 железнодорожных вокзалов,

нарушения на которых образуют нежелательный уровень пожарного риска: Новосибирск-Западный, Каргат, Инская, Новосибирск-Южный, Болотная, Мошково, Кемерово, Ленинск-Кузнецкий, Междуреченск, Барнаул. В Московской региональной дирекции на 3 из 16 вокзалов выявлены нарушения по отношению к: системе вентиляции и кондиционирования, системе энергообеспечения, оборудованию для обслуживания пассажиров. На 3-х (из 21-го) вокзала Восточно-Сибирской региональной дирекции выявлены нарушения ТПБ по отношению к: электрощиту, производственному оборудованию, электрооборудованию кухни.

При агрегации результатов оценок пожарных рисков на центральном уровне управления было установлено, что на 25 вокзалах выявленные нарушения по отношению к системам инженерного обеспечения, образующие нежелательный уровень пожарного риска; на 254 вокзалах риск оценен как допустимый; на 71 вокзалах – не принимаемый в расчет. Ввиду высокой социальной значимости объектов все вокзалы переведены в зону допустимого риска за счет проведенных мероприятий.

Таким образом, апостериорная оценка пожарных рисков позволяет ранжировать региональные дирекции по уровню пожарной опасности, а априорная оценка риска на основании аудита обеспечивает возможность сравнения вокзалов между собой. Предложенный подход также позволяет формировать планы оперативного управления пожарной безопасностью (нарушения по отношению к ПИО) и инвестиционные планы (нарушения по отношению к системам противопожарной защиты).

#### **4.1.4.2 Аудит пожарной безопасности постов электрической централизации и результаты оценки пожарных рисков**

Опытным полигоном для оценки пожарных рисков на постах ЭЦ в 2017 г. были Западно-Сибирская (8 постов ЭЦ) и Октябрьская железные дороги (8 постов ЭЦ). Всего было заполнено 3711 КОК. Для каждого поста ЭЦ, исходя из его оснащения формировался свой набор КОК на основе классификатора пожароопасных состояний и нарушений ТПБ поста ЭЦ. На 13 видах объектов были выявлены пожароопасные состояния (Рисунок 4.1).

По результатам проведенных мероприятий по обеспечению пожарной безопасности все объекты были переведены в зону допустимого риска, за счет устранения выявленных пожароопасных состояний.

При оценке пожарных рисков постов ЭЦ на всей сети железных дорог (36 постов 1-го и 2-го класса) в 2018 г. выявлены нежелательные уровни риска на 19 постах, вызванные нарушениями по отношению к оборудованию связи, автоматики и телемеханики. Результаты анализа оценки пожарных рисков постов ЭЦ приведены в работе [125].



Рисунок 4.1 – Объекты поста ЭЦ, по отношению к которым выявлены нарушения ТПБ

#### 4.1.4.3 Аудит пожарной безопасности тяговых подстанций и результаты оценки пожарных рисков

В качестве опытного полигона для оценки пожарных рисков тяговых подстанций (ТП) ОАО «РЖД» было определено 10 ТП. Из них на 4 ТП выявлен недопустимый уровень пожарного риска. На каждой из этих подстанций допущено более 10 пожароопасных состояний. Всего выявлено 122 пожароопасных состояний и нарушения требований пожарной безопасности.

#### 4.1.4.4 Аудит пожарной безопасности информационно-вычислительных центров и результаты оценки пожарных рисков

Аудит пожарной безопасности проводился в 2016 г. на 16 ИВЦ ОАО «РЖД». По результатам аудита пожарной безопасности рассчитаны пожарные риски без учёта и с учётом действия Систем обеспечения пожарной безопасности (далее – СОПБ) специалистами исследуемых ИВЦ. Результаты расчёта приведены в Таблице 4.5. К основным нарушениям ТПБ, выявленным на ИВЦ, относятся нарушения по отношению к условиям монтажа систем энергоснабжения (п. 2.1.47. гл. 2.1 ПУЭ), а также нарушения обеспечения выполнения работ по очистке вытяжных устройств от пожароопасных отложений. Работы по устранению выявленных нарушений были включены в планы проведения ремонтов ИВЦ.

Таблица 4.5 – Результаты оценки пожарного риска в ИВЦ

ИВЦ	Возможность реализации пожара		Уровень пожарного риска		Кол-во нарушений ТПБ
	без учета СОПБ	с учетом СОПБ	без СОПБ	с учетом СОПБ	
Новосибирский	$10^{-8}$	$10^{-8}$	Не принимаемый в расчет	Не принимаемый в расчет	0
Санкт-Петербургский	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$10^{-6}$	Нежелательный	Не принимаемый в расчет	6
Ярославский	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$10^{-6}$	Недопустимый	Не принимаемый в расчет	20
Воронежский	$10^{-6}$	$10^{-8}$	Допустимый	Не принимаемый в расчет	2
Екатеринбургский	$10^{-6}$	$10^{-8}$	Не принимаемый в расчет	Не принимаемый в расчет	1
Нижегородский	$10^{-6}$	$10^{-8}$	Не принимаемый в расчет	Не принимаемый в расчет	1
Самарский	$10^{-6}$	$10^{-8}$	Не принимаемый в расчет	Не принимаемый в расчет	1
Иркутский	$10^{-8}$	$10^{-8}$	Не принимаемый в расчет	Не принимаемый в расчет	1
Калининградский	$10^{-6}$	$5,94 \cdot 10^{-9}$	Не принимаемый в расчет	Не принимаемый в расчет	1
Саратовский	$10^{-6}$	$10^{-8}$	Не принимаемый в расчет	Не принимаемый в расчет	1

Хабаровский	$10^{-6}$	$7,74 \cdot 10^{-9}$	Не принимаемый в расчет	Не принимаемый в расчет	1
Ярославский	$10^{-6}$	$22,61 \cdot 10^{-12}$	Не принимаемый в расчет	Не принимаемый в расчет	1
Санкт-Петербургский	$10^{-6}$	$10^{-8}$	Не принимаемый в расчет	Не принимаемый в расчет	1
Челябинский	$10^{-6}$	$0,447 \cdot 10^{-8}$	Не принимаемый в расчет	Не принимаемый в расчет	2
Читинский	$10^{-6}$	$10^{-8}$	Не принимаемый в расчет	Не принимаемый в расчет	1

## 4.2 Мобильный программно-аппаратный комплекс для аудита пожарной безопасности железнодорожного вокзала

Для обеспечения возможности одновременного проведения массовых расчетов пожарных рисков на железнодорожных вокзалах создан МПАК, позволяющий проводить аудит пожарной безопасности и оценку пожарного риска. При разработке МПАК были реализованы следующие этапы:

- разработка форм ввода информации;
- разработка системы навигации;
- разработка системы расчета и создания отчёта о расчете.

Аппаратной платформой МПАК является планшетный компьютер, операционной системой – *Windows 8.1* для стационарных объектов ЖДТ и МУ на операционной системе *Android* для локомотивов.

### 4.2.1 Формы ввода результатов аудита пожарных рисков объектов инфраструктуры

Основной причиной разработки новой автоматизированной системы для оценки пожарного риска является отсутствие систем, учитывающих специфику работы объектов инфраструктуры ЖДТ и факторов, приводящих к появлению пожара. Подсистема ввода результатов аудита пожарных рисков включает в себя 3 этапа, приведенных на Рисунке 4.2. На рисунке выделены подэтапы аудита для оценки железнодорожных вокзалов.



Рисунок 4.2 – Этапы ввода данных в МПАК для расчета пожарного риска объектов инфраструктуры

Для ввода данных разработано 7 форм ввода (Таблица 4.6), переход к которым осуществляется последовательно по схеме, приведенной на Рисунке 4.3.

Таблица 4.6 – Состав частей для обозначения формы

№ этапа	Наименование этапа	№ блока на схеме 4.3	Назначение формы
I	Сведения об объекте	1.1	Ввод сведений о вокзале
I	Сведения об объекте	1.2	Ввод сведений о зданиях
I	Сведения об объекте	1.3	Ввод сведений о помещениях
II	Сведения о пожарной опасности	2	Ввод сведений о пожарной опасности
III	Сведения о пожарной безопасности	3.1.1	Ввод сведений о применяемых способах исключения горючей среды
III	Сведения о пожарной безопасности	3.1.2	Ввод сведений о применяемых способах исключения источников зажигания
III	Сведения о пожарной безопасности	3.2	Ввод сведений о системе защиты людей от опасных факторов пожара (ЗЛ)
III	Сведения о пожарной безопасности	3.3	Ввод сведений о системе тушения пожаров (ТПож)

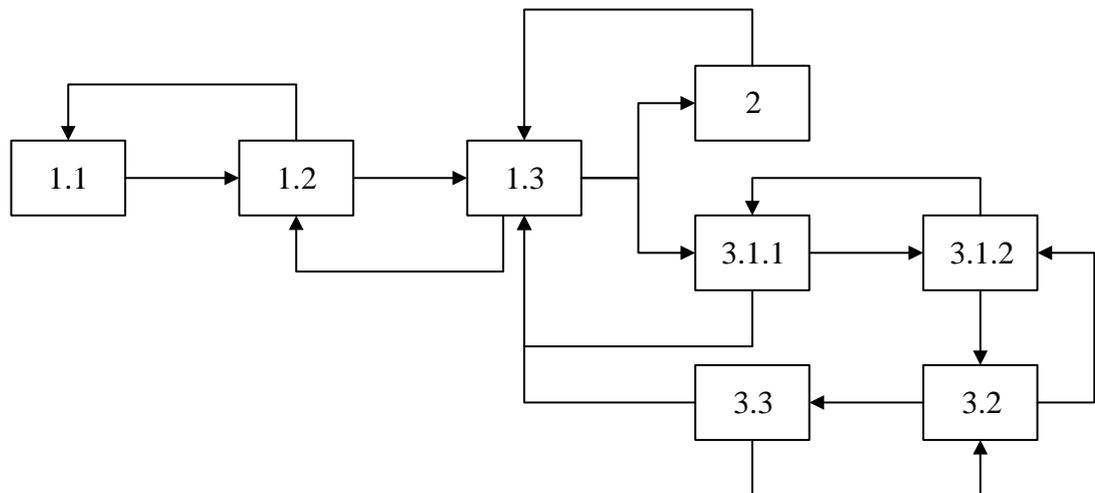


Рисунок 4.3 – Схема переходов между формами, реализуемая кнопками перехода на следующую и предыдущую формы

На каждой форме предусмотрены кнопки, реализующие переход на следующую и предыдущую формы. С формы 1.3 возможен переход на 2 формы (переход осуществляется по двум различным кнопкам). Такая функциональность реализована, т.к. сведения о пожарной опасности (нарушения ТПБ по отношению к ПИО) и сведения о пожарной безопасности (нарушения ТПБ по отношению к

системам обеспечения пожарной безопасности) могут собираться и регистрироваться независимо друг от друга.

Расчет риска может быть произведен только после ввода всей необходимой информации. Для облегчения работы пользователей реализована функция цветовой индикаторной поддержки статуса объемов введенной информации. Перечень и краткое описание возможных статусов форм и их цветовое обозначение приведено в Таблице 4.7.

Таблица 4.7– Статусы форм ввода

Наименование статуса формы	Цвет статуса	Примечания
Активна	Жёлтый	Форма в данный момент отображается
Заполнена	Зелёный	На форме введена вся информация для расчёта
Не заполнена	Красный	Форма пропущена и\или на ней не введена информация, необходимая для расчёта
Не активна	Серый	Форма недоступна для перехода и ввода информации

Изображение реализованного общего окна с отмеченными на нём кнопками представлено на Рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Общая страница. Основные кнопки

Перечень всех кнопок с оценкой ожидаемой частоты использования (по качественной шкале) в процессе проведения аудита приведен в Таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Перечень кнопок на общей странице

<b>№</b>	<b>Наименование кнопки</b>	<b>Частота использования</b>
1	«Далее»	Часто
2	«Назад»	Редко
3	«Домой»	Редко
4	«Список доступных форм»	Часто
5	«Пожарная опасность»	Часто
6	«Пожарная безопасность»	Нечасто
7	«Нарушения»	Часто
8	«Удалить»	Редко

Вид реализованной формы 3.2 (Ввод сведений о системе защиты людей от опасных факторов пожара) представлен на Рисунке 4.5. Вид реализованной формы 2. Ввод сведений о пожарной опасности, содержащей две таблицы, представлен на Рисунке 4.6.

Ввод данных

1.1 1.2 1.3 2 3.1.1 3.1.2 3.2 3.3

### III. Сведения о пожарной безопасности

#### 3.2 Сведения о системе защиты людей от опасных факторов пожара (ЗЛ)

Таблица 7 - Сведения о системе защиты людей от опасных факторов в помещениях Серверный (Здание Савеловского вокзала, Савеловский вокзал)

№ п/п	Способ обеспечения пожарной безопасности	Состояние	Справка
9	Системы обнаружения огня	<input checked="" type="radio"/> Нужны, соответствуют ТПБ <input type="radio"/> Не нужны <input type="radio"/> Нужны, не соответствуют ТПБ	?
10	Системы оповещения людей при пожаре	<input checked="" type="radio"/> Нужны, соответствуют ТПБ <input type="radio"/> Не нужны <input type="radio"/> Нужны, не соответствуют ТПБ	?
11	Системы управления эвакуацией людей при пожаре	<input checked="" type="radio"/> Нужны, соответствуют ТПБ <input type="radio"/> Не нужны <input type="radio"/> Нужны, не соответствуют ТПБ	?
12	Эвакуационные пути	<input checked="" type="radio"/> Нужны, соответствуют ТПБ <input type="radio"/> Не нужны <input type="radio"/> Нужны, не соответствуют ТПБ	?
13	Объемно-планировочные и конструктивные решения безопасных зон в здании	<input type="radio"/> Нужны, соответствуют ТПБ <input checked="" type="radio"/> Не нужны <input type="radio"/> Нужны, не соответствуют ТПБ	СП 1.13130.2009; 123-ФЗ (статья 53); ППР пункты: 23 в), 11, 23 д), 23 ж), 25, 33, 34, 35, 36 а)-е), 37, 39, 43, 91, 107, 115 в), 115 д), 116, 120, 122, 336 б), 461 а)
14	Средства коллективной защиты людей на путях эвакуации от опасных факторов пожара	<input checked="" type="radio"/> Сист. противодым. защ. нужны, соот. <input type="radio"/> Сист. противодым. защ. нужны, не со. <input type="radio"/> Сист. противодым. защ. не нужны <input type="radio"/> Др. ср-ва кол. защ. нужны, соотв. ТПБ <input type="radio"/> Др. ср-ва кол. защ. нужны, не соотв. 1 <input type="radio"/> Др. ср-ва кол. защ. не нужны	?
15	Средства индивидуальной защиты	<input checked="" type="radio"/> Нужны, соответствуют ТПБ <input type="radio"/> Не нужны <input type="radio"/> Нужны, не соответствуют ТПБ	?

Рисунок 4.5 – Вид реализованной формы 3.2

Ввод данных

1.1 1.2 1.3 2 3.1.1 3.1.2 3.2 3.3

### II. Сведения о пожарной опасности

Таблица 4 - Сведения о потенциальных источниках огня в помещениях Серверный (Здание Савеловского вокзала, Савеловский вокзал) и нарушениях относительно них

#### Нарушения относительно потенциального источника огня

(Временные потенциальные источники огня, ппо1)

№ п/п	Тип потенциально	№ п/п	Вид нарушения ТПБ	Нормативный правовой документ	Пункт нормативного правового документа	Отметка об устранении
1	Временные потенци.	1		ППР	187 в)	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Временные потенци.	2	Конструкция технолог.	ППР	173	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Временные потенци.					

Рисунок 4.6 – Вид реализованной формы 2

#### 4.2.2 Системы расчета и создания отчёта о расчете пожарного риска

После расчёта пожарного риска для выбранных объектов необходимо визуализировать полученные результаты. Программное обеспечение МПАК реализует вывод результата расчёта в окно программы, а также обеспечивает возможность выгрузки результатов в *PDF* и *XML* документы.

Отчет о результатах аудита и расчёта пожарного риска формируется следующим образом:

- результаты расчёта представлены в виде матрица риск и таблиц с данными;

- для структурного вывода результата расчёта разработана структура *XML* – документа, с помощью которого осуществляется управление внешним видом таблиц. Кроме того, данные преобразовываются в *PDF* – документ;

- матрицы риска отображаются как в *PDF* – документе, так и в окне программы. При этом обеспечена возможность отображения на матрице риска точек (координаты риска), связующих их стрелок и подписей к точкам на матрицу.

Внешний вид матрицы риска изображен на Рисунке Б.1 Приложения Б. Из рисунка видно, что матрица имеет несколько зон, окрашенных в разный цвет, в соответствии с различным уровнем риска. Базовый элемент матрицы – ячейка, характеризующаяся значениями координат её начала и конца по двум осям, а также цветом, шириной и высотой.

### **4.3 Оценка пожарных рисков на тяговом подвижном составе**

Для оценки пожарных рисков на тяговом подвижном составе ОАО «РЖД» разработано СТО РЖД 15.016-2017 «Тяговый подвижной состав. Правила оценки и управления пожарными рисками» (утв. Распоряжение ОАО «РЖД» от 29 декабря 2017 г. №2084р), а также следующие документы, являющиеся вспомогательными при реализации положений СТО РЖД 15.016-2017:

— Методика расчета пожарного риска на тепловозах ОАО «РЖД» (утв. 10.12.2015)

— Методика расчета пожарного риска на электровозах ОАО «РЖД» (утв. 10.12.2015);

— Классификатор нарушений требований пожарной безопасности на тепловозах и электровозах ОАО «РЖД» (утв. 15.12.2016 г.).

Выдержки из патента на способ определения пожарной опасности технических объектов железнодорожного транспорта и система для его реализации приведены в Приложении Д. Акты внедрения приведены в Приложении Е.

#### **4.3.1 Апостериорная оценка пожарных рисков тягового подвижного состава**

По результатам оценки апостериорного риска пожаров с учётом оценки трудозатрат на устранение последствий пожара определены уровни пожарного риска для 13 серий тепловозов и 18 серий электровозов. На основании этих оценок сформулирован перечень из 8 пожароопасных серий: 3ТЭ10, 2ТЭ116, 2ТЭ10, 2М62, ВЛ85, ВЛ11, ВЛ10, ВЛ80. Матрицы рисков и координаты рисков серий локомотивов приведены в Приложении Б. Шкалы для оценки уровней рисков ТПС по фактическому состоянию приведены в Приложении Б (Рисунок Б.7 – Б.12). Для этих серий был введен режим повышенного контроля за состояниями пожарной опасности в период летних и осенних комиссионных осмотров.

#### **4.3.2 Классификатор нарушений требований пожарной безопасности на тяговом подвижном составе**

На основе анализа пожарной безопасности локомотивов [126] выделены 2 группы факторов, влияющих на пожарную безопасность тягового подвижного

состава (ТПС): фактическое состояние узлов ТПС и перепробег по видам технического обслуживания и ремонта. На основании этого составлены КОК для сбора данных о фактическом состоянии узлов. Перечень пожароопасных состояний сформирован экспертной группой ОАО «РЖД» (пример обработки мнения экспертов см. в Приложении А). Для каждого пожароопасного состояния узла ТПС, в соответствии с положениями п. 2.4.1.2 определена вероятность появления пожароопасного события. КОК узлов ТПС (тепловоза) приведены в Приложении В, Таблица В.7.

### 4.3.3 Априорная оценка вероятности пожароопасного события из-за пожароопасных состояний на тяговом подвижном составе

Индивидуальную оценку состояния ТПС на линейном уровне управления (эксплуатационное депо) осуществляет команда внутреннего аудита. Оценка вероятности появления пожароопасного состояния  $j$ -го узла выполняют на основании выявленных пожароопасных состояний по формуле:

$$P_j^{\text{КОК}} = \sum_{i=1}^n P_{ij}^{\text{КОК}}, \quad (37)$$

где  $P_{ij}^{\text{КОК}}$  - значение веса влияния  $i$ -го отмеченного пожароопасного состояния  $j$ -го пожароопасного узла на вероятность возникновения пожара (загорания),

$n$  – количество выявленных (отмеченных) состояний.

Расчет вероятности возникновения пожара (загорания) в  $j$ -м пожароопасном узле локомотива выполняют на основе заполненной КОК по  $j$ -му пожароопасному узлу и вычисляют по формуле:

$$P_j^{\text{узел}} = P_j^{\text{КОК}} + \Delta_{\text{ТО/ТР}j} - P_j^{\text{КОК}} \cdot \Delta_{\text{ТО/ТР}j}, \quad (38)$$

где  $\Delta_{\text{ТО/ТР}j}$  – коэффициент, учитывающий долю  $i$ -х пожароопасных состояний по  $j$ -му пожароопасному узлу, которые невозможно выявить при проведении пожарного аудита.

Расчет вероятности возникновения пожара (загорания) для секции локомотива в целом выполняют на основе всех заполненных КОК по узлам оцениваемой секции по формуле:

$$P_j^{\text{секции}} = \max\{P_j^{\text{узел}}\} + P_{\text{ТО/ТР}}^{\text{пер}} - 2 \cdot \max\{P_j^{\text{узел}}\} \cdot P_{\text{ТО/ТР}}^{\text{пер}}, \quad (39)$$

где  $\max\{P_j^{узел}\}$  – максимальная вероятность возникновения пожара (загорания) по  $j$ -му узлу секции;

$P_{ТО/ТР}^{пер}$  - вероятность возникновения нежелательного события, которое может привести к пожароопасному отказу (значения, в зависимости от величины перепробега приведены в Таблицах 4.9 и 4.10).

Таблица 4.9 – Значение вероятности возникновения нежелательного события (дата постройки ТПС с 2000 года)

Вид ремонта	Вероятность нежелательного события, $P_{ТО/ТР}^{пер}$	
	при перепробеге	при нормативах
ТО-2	0	0
ТО-3	0	0
ТР-1	0	0
ТР-2	0,049	0,0007
ТР-3	0,049	0,0007
СР	0,22	0,004
КР	0,01	0,0049

Таблица 4.10 – Значение вероятности возникновения нежелательного события (дата постройки ТПС до 2000 года)

Вид ремонта	Вероятность нежелательного события, $P_{ТО/ТР}^{пер}$	
	при перепробеге	при нормативах
ТО-2	0,066	0,048
ТО-3	0,066	0,048
ТР-1	0,066	0,048
ТР-2	0,221	0,037
ТР-3	0,221	0,037
СР	0,575	0,014
КР	0,427	0,02

Расчет вероятности возникновения пожара для секции локомотива в целом после проведения компенсирующих риск мероприятий выполняются на основе расчетных значений вероятностей по секциям ТПС по формуле:

$$P_{ТПС}^{ком} = \max\{P_{jком}^{секции}\}, \quad (40)$$

На основании рассчитанного значения  $R_{\text{ТПС}}^{\text{КОМ}}$  определяют уровень пожарного риска ТПС по шкале рисков. Шкалы рисков ТПС приведены в Приложении Б.

#### 4.3.4 Аудит пожарной безопасности тягового подвижного состава с помощью мобильного устройства

В процессе аудита пожароопасных состояний ТПС [127] на опытном полигоне<sup>27</sup> в Дальневосточной дирекции тяги выявлено 1823 неисправности, образующих недопустимый уровень риска на эксплуатирующихся тепловозах и электровозах. На Рисунке 4.7 приведена информация о количестве пожароопасных неисправностей, выявляемых при проведении аудита пожарных рисков тепловозов серии 3ТЭ10.

В период весеннего комиссионного осмотра 2018 г. в эксплуатационных депо Дальневосточной дирекции тяги на 221 ТПС было выявлено 9761 пожароопасная неисправность на тепловозах серии ТЭ10. К окончанию комиссионного осмотра все опасные состояния были устранены и локомотивы допущены к эксплуатации. В эксплуатационных депо Красноярской дирекции тяги было на 585 электровозах серии ВЛ80 было выявлено 13318 пожароопасных неисправностей, устранено 13290.

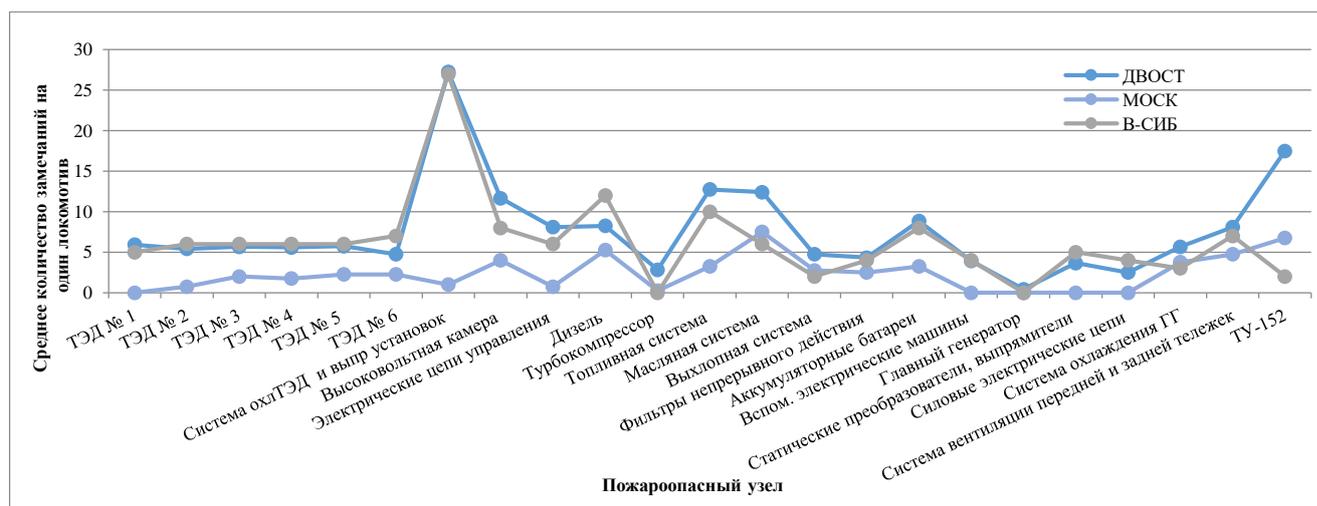


Рисунок 4.7 – Статистика выявления пожароопасных неисправностей на ТПС серии 3ТЭ10

<sup>27</sup> Осенний комиссионный осмотр 2017 г.

При постановке на плановый вид ремонта до проведения комиссионного осмотра и приведения к требованию пожарной безопасности согласно проведенным расчетам, в недопустимой зоне пожарного риска было 207 тепловозов ТЭ10, 14 имели нежелательный уровень пожарного риска, все 585 электровозов Красноярской дирекции тяги имели недопустимый уровень пожарного риска.

#### 4.4 Мобильный программно-аппаратный комплекс для оценки пожарных рисков тягового подвижного состава

На Рисунке 4.8 приведен алгоритм допуска локомотивов к эксплуатации на основе результатов оценки пожарных рисков. Для аудита пожарных рисков ТПС разработано приложение для операционной системы *Android* версии 8.0 и выше, экранные формы приведены на Рисунках 4.9 – 4.12. Такое приложение может быть использовано не только на планшетах, но и на мобильных телефонах, что значительно упрощает процесс проведения аудита ТПС в условиях ограниченного пространства локомотивов. Разработка осуществлялась на *framework react native*. Функциональность мобильного приложения следующая:

- добавление и изменение информации о периоде проведения аудита (года и сезона), см. Рисунок 4.10;
- добавление и изменение информации о серии и номере локомотива, см. Рисунок 4.11;
- добавление и изменение информации о состоянии узлов локомотива, см. Рисунок 4.12;
- просмотр результатов оценки риска локомотива на основании аудита, см. Рисунок 4.13.
- сохранение результатов аудита и формирования *json*-файла.

Формирование *json*-файла в рамках работы мобильного приложения позволяет не только независимо от приложения хранить результаты аудита, но и использовать их в программном обеспечении стационарного компьютера.

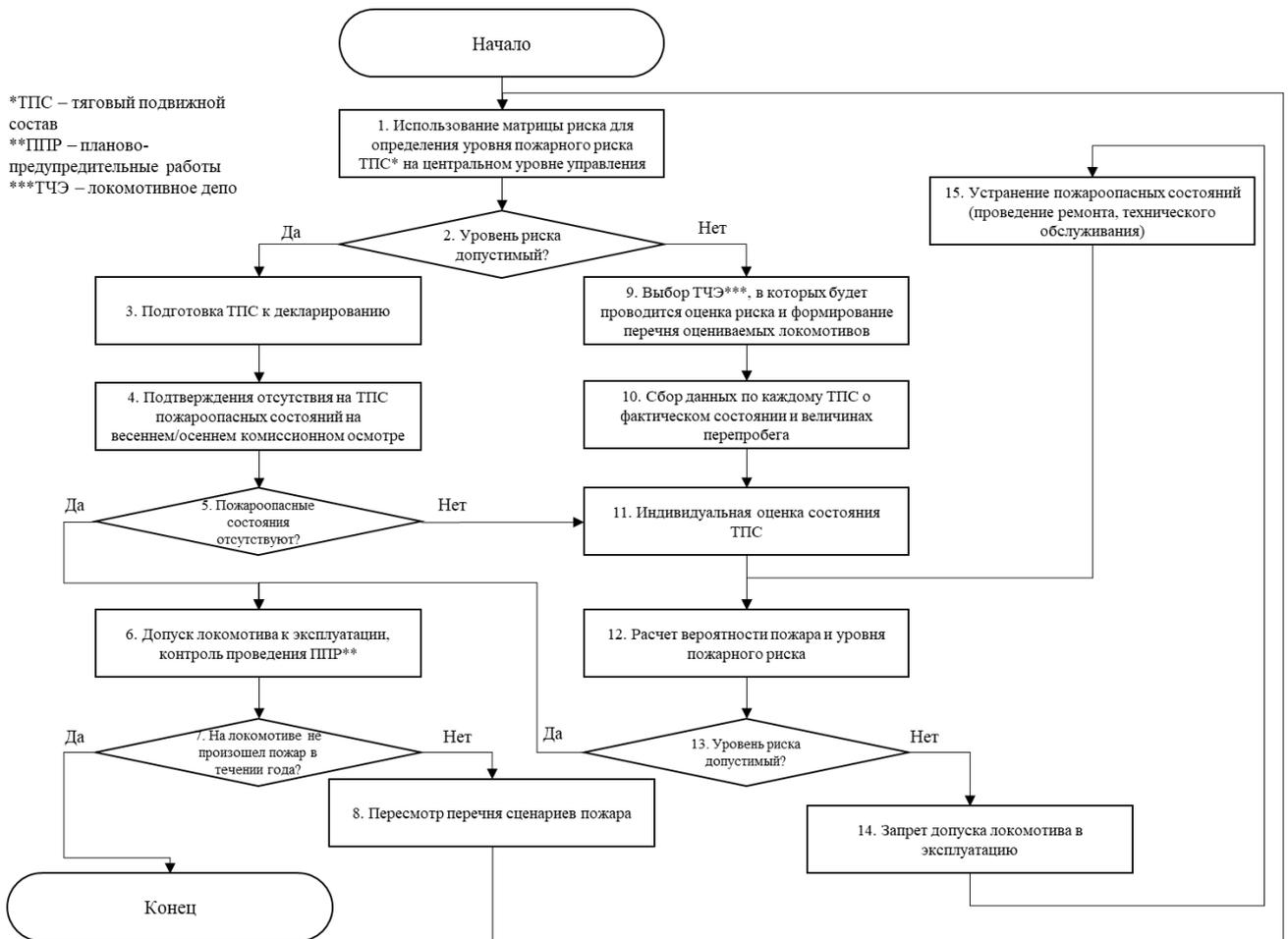


Рисунок 4.8 – Алгоритм допуска локомотивов к эксплуатации по результатам оценки пожарных рисков

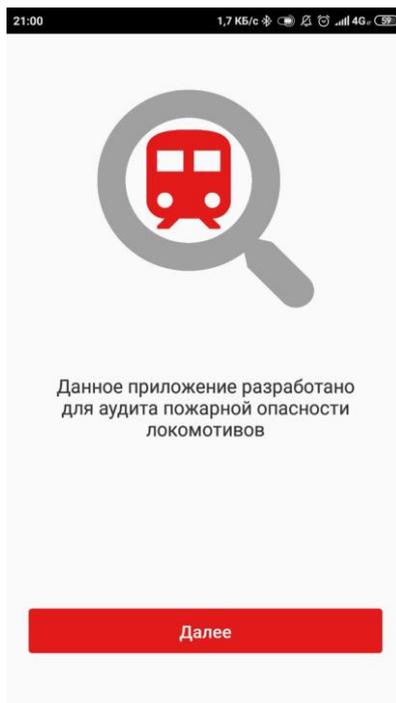


Рисунок 4.9 – Стартовая страница мобильного приложения на Android

а)

б)

в)

г)

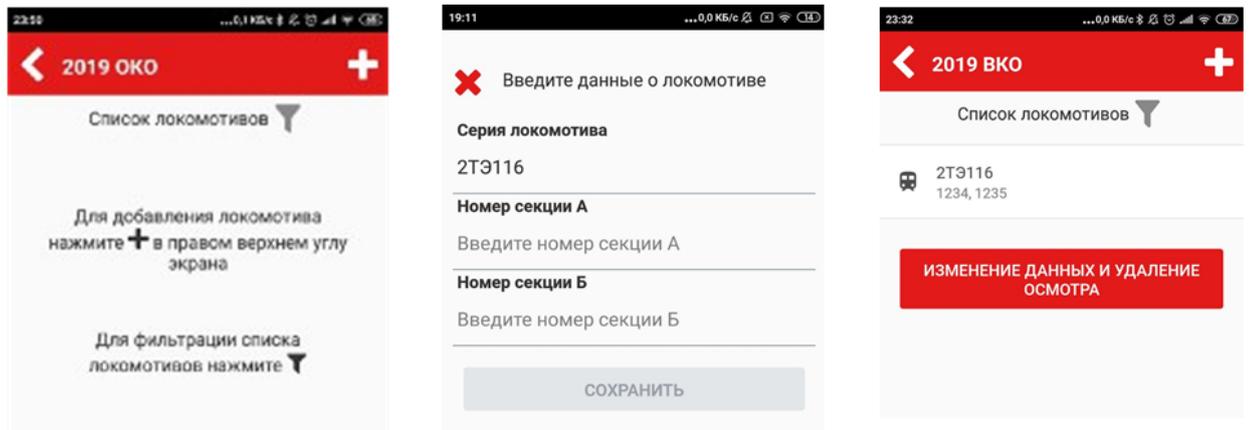
Рисунок 4.10 – Информация о периоде проведения аудита

а) параметры осмотра не заданы

б) параметры осмотра заданы

в) выбор года осмотра

г) выбор сезона осмотра



а)

б)

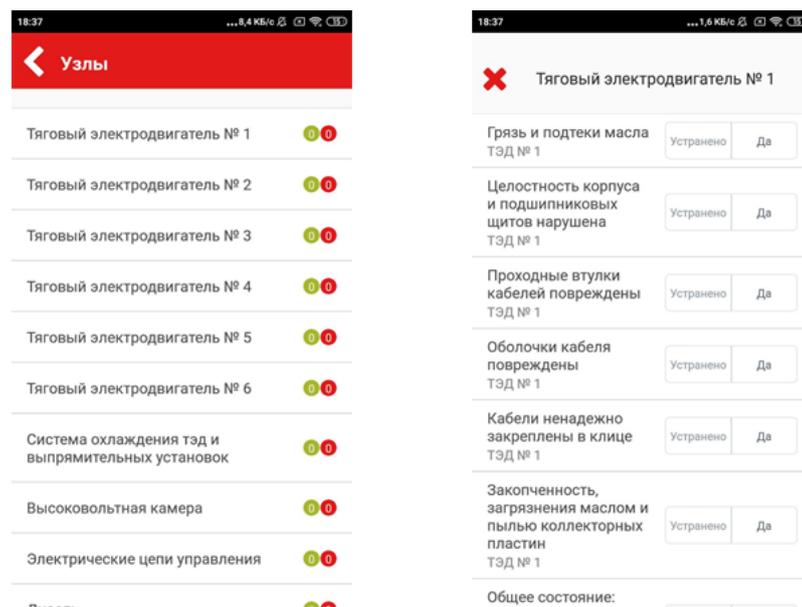
в)

Рисунок 4.11 – Информация о серии и номере локомотива

а) форма добавления локомотива

б) форма ввода информации о локомотиве

в) форма отображения списка локомотивов с одним локомотивом



а)

б)

Рисунок 4.12 – Аудит состояния локомотива

а) выбор узла локомотива

б) выбор состояния локомотива

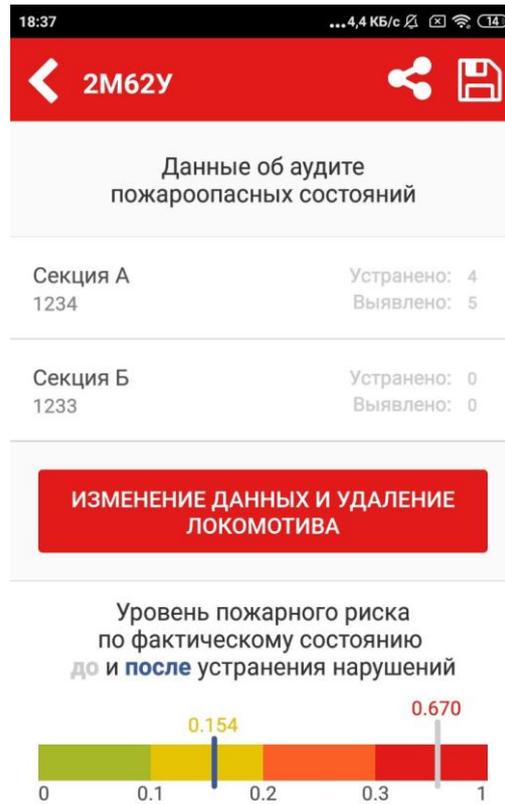


Рисунок 4.13 – Результаты оценки пожарного риска

#### 4.5 Достоверность научных положений и результатов диссертационной работы

Достоверность научных положений и результатов диссертационной работы подтверждена экспериментальными исследованиями и практической апробацией разработанных методов и МПК. После внедрения результатов исследования (с 2017 г.) наблюдается снижение количества пожаров. Для оценки значимости изменений количества пожаров использован критерий Фридмана, позволяющий работать с малыми статистическими выборками [128]. Установлено, что есть основания для отвержения гипотезы *H<sub>0</sub>*: повторные измерения одних и тех же объектов имеют одинаковое распределение. В таблице 4.11 приведена информация о результатах проверки гипотезы *H<sub>0</sub>* для оценки количества пожаров на локомотивах при уровне значимости  $\alpha = 0,1$  и критическом значении критерия для трех выборок при трех наблюдениях, равном 6.

Таблица 4.11 – Проверка гипотезы об однородности связанных выборок

Объект	Количество пожаров за период (дискретность – год)			статистика хи-квадрат Фридмана	Вывод
	2013-2015 г.	2015-2017 г.	2018-2020 г.		
Тепловозы и электровозы	82, 72, 75	51, 47, 54	30, 31, 22	6	Отклонить <i>H<sub>0</sub></i>
Среднее за период (тепловозы и электровозы)	76	51	28		
Тепловозы	47, 48, 49	35, 36, 32	14, 18, 13	6	Отклонить <i>H<sub>0</sub></i>
Среднее за период (тепловозы)	48	34	15		
Электровоз	35, 23, 27	16, 11, 22	16, 13, 9	4,909	Отклонить <i>H<sub>0</sub></i>
Среднее за период (электровозы)	28	16	12		

Таким образом, выборки, характеризующие 3 периода наблюдения, имеют различное распределение. При этом наблюдается снижение количества пожаров (см. средние значения в Таблице 4.11). Наиболее существенное снижение

достигнуто в третьем периоде наблюдений (2018 – 2020 г.), когда наряду с другими инструментами повышения пожарной безопасности применялись инструменты управления пожарными рисками.

За период наблюдения на стационарных объектах, имеющих допустимый и не принимаемый в расчет уровень пожарного риска (на основе оценки априорной вероятности появления пожароопасного состояния) не было допущено пожаров. Анализ материалов, разбор случаев пожара на постах ЭЦ, не участвующих в апробации, показал, что в 60 % случаев состояния, приведшие к пожарам, могли быть выявлены в ходе аудита пожарных рисков. При своевременном выявлении и устранении пожароопасных неисправностей часть пожаров могла быть предотвращена. 40 % пожаров были связаны с ошибками проектирования, а также человеческим фактором. Исследование, формализация и включение этих факторов в метод априорной оценки пожарных рисков являются перспективами исследования.

Адекватность предложенного способа диагностирования неисправностей объектов ЖДТ, приводящих к пожарным рискам, подтверждается экспертами, которые не принимали участие в составлении классификатора. В частности, эксперты подтвердили:

1. необходимость отдельной оценки СПЗ и ПИО;
2. целесообразность обследования оборудования специалистами, ответственными или компетентными в эксплуатации оборудования. При этом отдельно была отмечена необходимость обследования оборудования автоматики и телемеханики опытными работниками, в т.ч. путем привлечения таких работников с уровня региональной дирекции или с других постов ЭЦ, если представитель обследуемого поста ЭЦ обладает опытом работы менее года;
3. преимущество использования КОК перед протоколами обследования, т.к. структурированные таблицы лучше поддаются сравнению и позволяют отслеживать и быстро фиксировать изменения.

В ходе обследования информационно-вычислительного центра Новосибирска отмечено, что предлагаемый способ оценки пожарных рисков

позволит осуществлять подготовку к проверкам МЧС, т.к. в КОК включены основные нарушения, выявляемые в ходе плановых проверок.

В ходе обследования тяговых подстанций отмечено следующее преимущество способа априорной оценки пожарных рисков перед оценкой индивидуального пожарного риска: оценка оборудования, располагаемого вне здания, в т.ч. трансформаторов, распределительных устройств и других объектов. При оценке индивидуальных пожарных рисков учитываются только объекты, которые располагаются в здании, что существенно ограничивает количество сценариев пожара.

В ходе обследования железнодорожных вокзалов отмечены преимущества численной оценки опасности каждого состояния и априорной оценки вероятности пожара, т.к. это позволяет аргументированно требовать устранения нарушений от арендаторов и уменьшает время между выявлением нарушения и его устранением.

По результатам апробации методики оценки пожарных рисков на тяговом подвижном составе в Центральной дирекцией тяги – филиале ОАО «РЖД» (ЦТ) было принято решение проводить оценку пожарных рисков на всей сети железных дорог. Дополнительно специалистами ЦТ был организован процесс проведения анализа времени и ресурсов, затрачиваемых локомотивными депо на устранение пожароопасных неисправностей. В 2019 – 2020 гг. ЦТ был расширен список серий локомотивов, на которых необходимо проводить оценку пожарных рисков для тиражирования опыта оценки пожароопасных серий. В ходе апробации произошел пожар на двух локомотивах серии 2ТЭ116. По результатам расследования случаев пожара и анализа заполненных на локомотивы КОК было установлено, что пожароопасные состояния, выявленные в ходе аудита, не были устранены, а причинами пожаров были состояния узлов, имевших недопустимый уровень пожарного риска.

Корректность результатов расчетов, проведенных с помощью МПК, проверялась путем проведения вычислений вручную, а также с помощью формы *EXCEL*, разработанной для частичной автоматизации расчета.

Достоверность также базируется на корректно использованных положениях и постулатах теории вероятности, теории графов.

## **Выводы по Главе 4**

1. На основании статистики количества и последствий пожара выделены 4 группы стационарных объектов ЖДТ, имеющих особый приоритет с точки зрения обеспечения пожарной безопасности: железнодорожные вокзалы (объекты с массовым пребыванием людей), посты электрической централизации (пожар приводит к приостановке автоматической централизации на железнодорожных путях), тяговые подстанции (пожар приводит к приостановке электроснабжения), информационно-вычислительные центры (возможна приостановка коммуникации и обмена данных на сети железных дорог). Для этих объектов разработаны и утверждены в ОАО «РЖД» методики оценки пожарных рисков.

2. За период наблюдения (с 2011 по 2017 гг.) на основных стационарных объектах не было допущено пожаров, на которых был бы причинен вред пассажирам или сотрудникам ОАО «РЖД». Вместе с тем, выявлен перечень региональных дирекций ОАО «РЖД», имеющих нежелательный уровень пожарного риска на постах ЭЦ, железнодорожных вокзалах, тяговых подстанциях, информационно вычислительных центрах ОАО «РЖД» (далее – основных стационарных объектах).

3. Разработаны классификаторы неисправностей объектов ЖДТ, влияющих на пожарный риск на стационарных и передвижных объектах ЖДТ и контрольно-оценочные карты как инструмент, позволяющий сформировать совокупность пожароопасных состояний, а также объем выборки контролируемых характеристик пожароопасных узлов объектов ЖДТ для постов электрической централизации, тягового подвижного состава, информационно-вычислительных центров ОАО «РЖД», тяговых подстанций ОАО «РЖД», железнодорожных вокзалов.

4. Разработаны методики оценки пожарных рисков на основных стационарных объектах ЖДТ, позволяющие оценивать априорную вероятность пожара на основании результатов пожарного аудита. Проведен аудит пожарной опасной опасности основных стационарных объектов ЖДТ, в т.ч. аудит 365 железнодорожных вокзалов, 44 постов ЭЦ, 10 тяговых подстанциях, 16 информационно-вычислительных центров. По результатам аудита проведены

расчёты пожарного риска на основных стационарных объектах ОАО «РЖД» и выявлен нежелательный уровень пожарного риска для 25 железнодорожных вокзалов, 19 постов ЭЦ, 4 тяговых подстанций.

5. Проведен аудит пожарной безопасности и оценка пожарного риска на 806 локомотивах. По результатам оценки пожарных рисков устранено 23051 пожароопасное состояние. При постановке на плановый вид ремонта до проведения комиссионного осмотра и приведения к требованию пожарной безопасности согласно проведенным расчетам, в недопустимой зоне пожарного риска было 207 тепловозов ТЭ10, 14 из них имели нежелательный уровень пожарного риска. Все 585 электровозов Красноярской дирекции тяги имели недопустимый уровень пожарного риска. Эти результаты стали основанием для оперативного проведения мероприятий по повышению пожарной безопасности на электровозах Красноярской дирекции тяги.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Обоснована целесообразность разработки и использования алгоритмов интеллектуализации диагностики неисправностей объектов ЖДТ, приводящих к повышению пожарного риска. Анализ состояния проблемы оценки и управления пожарными рисками на объектах ЖДТ, видов автоматизированных систем управления пожарными рисками в России и странах Европы позволил выявить необходимость разработки методов и алгоритмов, обеспечивающих возможность прогнозирования вероятности пожара на основе технических характеристик объектов железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава.

2. Разработаны классификаторы неисправностей объектов ЖДТ, дестабилизирующих пожарную безопасность, а также контрольно-оценочные карты для интеллектуализации их диагностики в рамках автоматизированного аудита пожарных рисков на постах электрической централизации, тяговом подвижном составе, информационно-вычислительных центрах ОАО «РЖД», тяговых подстанциях ОАО «РЖД», железнодорожных вокзалах.

3. Разработан метод математического моделирования пожарного риска объекта ЖДТ на стадии его эксплуатации. Метод основывается на результатах статистического анализа пожаров и отказов на объектах ЖДТ. Он заключается в формализации описания процесса изменений состояний объекта ЖДТ с помощью ориентированного графа состояний, моделировании развития событий, приводящих к пожару.

4. Предложен способ определения вероятности перехода объекта в опасные состояния из выявленного неопасного состояния, обеспечивающий возможность определения априорной вероятности появления пожара на основе информации о начальном и последующих возможных состояниях объекта ЖДТ, выявленных по результатам аудита.

5. Разработаны способ и алгоритмы автоматизированного диагностирования пожарных рисков ПИО на объектах инфраструктуры и подвижного состава, впервые позволяющие собирать исходные данные для оценки пожарных рисков без привлечения сотрудников надзорных органов.

6. Разработаны методики оценки пожарных рисков объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ. Эти методики реализованы в ОАО «РЖД» в системе управления пожарными рисками.

7. Создан мобильный программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить аудит пожарной безопасности и оценку пожарного риска на стадии эксплуатации объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, обеспечивающий возможности одновременного проведения массовых расчетов пожарных рисков.

8. Проведены расчёты пожарного риска для 407 стационарных объектов ОАО «РЖД». По результатам диагностирования пожароопасных состояний выявлен нежелательный уровень пожарного риска для 25 (из 365) железнодорожных вокзалов, 19 (из 32) постов ЭЦ, 4 (из 10) тяговых подстанций.

9. Проведены аудит и оценка пожарного риска на 806 локомотивах, по результатам которых устранено 23051 пожароопасное состояние. В Дальневосточной дирекции тяги недопустимый уровень пожарного риска был выявлен для 207 тепловозов ТЭ10, у 14 тепловозов установлен нежелательный уровень пожарного риска. Для 585 электровозов Красноярской дирекции тяги был установлен недопустимый уровень пожарного риска.

В качестве рекомендаций и перспективы дальнейшей разработки темы диссертации предлагается повышение точности и достоверности прогнозирования пожарных рисков объектов ЖДТ путем обработки больших данных о пожароопасных состояниях объектов транспорта методами и алгоритмами искусственного интеллекта *Data Mining* и *Data Science*.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Арканов, В.П. Обеспечение пожарной безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта [Текст] / В.П. Арканов // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2015. – № 1-2 (6). – С. 157-159.

2. Плеханов, П.А. Обеспечение комплексной безопасности на железнодорожном транспорте в контексте стратегического развития [Текст] / П.А. Плеханов // Известия петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17, № 4. – С. 552-565.

3. Биленко, Г.М. Технические средства обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте. Учебное пособие [Текст] / Г.М. Биленко, Е.С. Власова, И.М. Власов, А.А. Шахотин, О.А. Луцкова // М.: Изд. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта». – 2019. – 168 с.

4. Вакуленко, С.П. О перспективах развития нормативной базы безопасности движения на железнодорожном транспорте [Текст] / С.П. Вакуленко, Н.П. Журавлев, М.Ю. Савельев, А.А. Сидарков // Тенденции развития железнодорожного транспорта и управления перевозочным процессом. Материалы международной юбилейной научно-технической конференции, посвященной 95-летию кафедр «Железнодорожные станции и транспортные узлы», «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте». – 2020. – с. 33-41.

5. Веревкина, О.И. Применение гибридного метода оценки функциональных рисков нарушения безопасности движения в хозяйстве пути на железнодорожном транспорте [Текст] / О.И. Веревкина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. – № 1 (61). – с. 55-64.

6. Катцын, Д.В. Математические закономерности пожаров на железнодорожном транспорте [Текст] / Д.В. Катцын // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20, № 3. – с. 15-21.

7. Королева, Л.А. Концептуальные основы обеспечения пожарной безопасности при железнодорожных перевозках опасных грузов [Текст]: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук 05.26.03 / Королева Людмила Анатольевна // Санкт-Петербург, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2019. – 423 с.

8. Елисеев, И.Б. Методика оценки и способы снижения пожарной опасности пассажирских вагонов железнодорожного подвижного состава [Текст]: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук 05.26.03 // Санкт-Петербург, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2018. – 122 с.

9. Аксютин, В.П. Пожарная безопасность железнодорожного подвижного состава [Текст] / В.П. Аксютин, Н.А. Шелудько, А.Г. Крылов, Ю.П. Никифоронок // М.: Трансинфо. – 2016. – 456 с.

10. Бурлов, В.Г. Применение методов нелинейного программирования при управлении безопасностью пожарного [Текст] / В.Г. Бурлов, А.И. Шершнева, М.В. Миронова, С.А. Шавуров // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Материалы XXVIII международной конференции. Под общей редакцией А.О. Калашникова, В.В. Кульбы. – 2020. – С. 154-158.

11. Прус, М.Ю. Матричное представление техногенных, природных и пожарных рисков [Текст] / М.Ю. Прус // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Материалы XXVII международной конференции. Под общей редакцией А.О. Калашникова, В.В. Кульбы. – 2019. – С. 237-242.

12. Прус, М.Ю. О векторно-матричном представлении пожарных и техногенных рисков при моделировании социотехнических систем [Текст] / М.Ю. Прус, А.Р. Колесникова, Е.А. Клепко, В.М. Шаповалов // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Материалы XXII международной конференции. – 2014. – С. 245-250.

13. Мавлянкариев, Б.А. Организация противопожарной защиты территорий на основе сценарной оценки ситуаций [Текст] / Б.А. Мавлянкариев, Б.Б. Хатамов,

А.Ю. Пен, Д.М. Тохтамударов, У.А. Ёкубов // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Материалы XXII международной конференции. – 2014. – С. 352-354.

14. Шикульская, О.М. Применение математической теории игр для обеспечения пожарной безопасности зданий и сооружений на стадии проектирования [Текст] / О.М. Шикульская, И.С. Ватунский // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2019. – № 4 (30). – С. 146-149.

15. Топольский, Н.Г. Основы применения теории игр в автоматизации систем пожарной безопасности. Монография [Текст] / Н.Г. Топольский, М.Б. Домбровский. – М.: Высш. инженерная пожарно-техническая шк. МВД РФ. – 1996. – 117 с.

16. Баратов, А.Н. Оценка пожарной опасности производств, связанных с применением горючих газов и жидкостей [Текст] / А.Н. Баратов, М.Г. Годжелло // М.: Изд. МКХ РСФСР. – 1961. – 82 с.

17. Верховский, Е.И. Пожарная безопасность на предприятии радиоэлектроники. Учебное пособие [Текст] / Е.И. Верховский // М.: Изд. Высшая школа – 1987. – 128 с.

18. Назаренко, Е.С. Пожарная безопасность деревообрабатывающих предприятий. Справочник [Текст] / Е. С. Назаренко, В. А. Казанцев // М.: Изд. Лесн. пром-сть. – 1990. – 271 с.

19. Ассоров, Ф.Г. Пожарная безопасность на морском транспорте [Текст] / Ф.Г. Ассоров, Б.И. Шпиков // М.: Изд. Транспорт. – 1968. – 312 с.

20. Гавриленко, А.М. Теоретические основы возникновения и развития корабельного пожара [Текст] / А.М. Гавриленко // СПб.: Изд. ВВМИУ им. Ф.Э. Дзержинского. – 1996. – 239 с.

21. Моторыгин, Ю.Д. Системный анализ моделей описания процессов возникновения и развития пожара [Текст]: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук 05.13.01 / Моторыгин Юрий Дмитриевич // Санкт-Петербург, университет Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2011. – 246 с.

22. Пожаровзрывобезопасность материалов и средства их тушения. В 2-х кн. [Текст]/ Под ред. А.П. Баранова и А.Я. Корольченко // М.: Изд. «Химия». – 1990. – Книга 1 – 496 с., – Книга 2 – 384 с.

23. Швырков, С.А. Анализ последствий чрезвычайных ситуаций при разрушениях резервуаров на объектах топливно-энергетического комплекса [Текст] / С.А. Швырков, С.В. Батманов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2008. – № 4. – С. 2-8.

24. Пожарные риски. Динамика, управление, прогнозирование. Монография [Текст] / Под ред. Н.Н. Брушиловского и Ю.Н. Шебенко // М.: Изд. ФГУ ВНИИПО. – 2007. – 370 с.

25. Брушлинский, Н. Н. Оценка рисков пожаров и катастроф [Текст] / Н. Н. Брушлинский, Ю. М. Глуховенко // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – Вып. 1 – М.: ВНИИТИ. – 1992. – С. 13-39.

26. Кузнецова, А.А. Усовершенствование методики расчета индивидуального и социального пожарного риска [Текст] / А.А. Кузнецова, В.А. Серегина // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – Т. 34, № 2 – С. 54-55.

27. Базилевич А.Я., Экспресс-оценка пожарных рисков для конструктивных элементов здания при изменении его функционального назначения [Текст] / А.Я. Базилевич, Д.Г. Карпенко // Пожаровзрывобезопасность. – 2003. – Т. 12, № 2. – С. 18-19.

28. Овсянников, М.Ю. Частные решения уравнений интегрального метода описания пожара в помещении. Дымоудаление. Линейное распространение горения по ТГМ. Критическая продолжительность пожара [Текст] / М.Ю. Овсянников, Е.Г. Родионов // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – Т. 13, № 5. – С. 81-85.

29. Кошмаров, Ю. А. Процессы нарастания опасных факторов пожара в производственных помещениях и расчет критической продолжительности пожара [Текст] / Ю. А. Кошмаров, В. В. Рубцов // М.: МИПБ МВД России, 1999. – 89 с.

30. Шебенко, Ю.Н. Оценка пожарного риска крупномасштабного терминала отгрузки нефти [Текст] / Ю.Н. Шебенко, В.П. Молчанов, Ю.И.

Дешевых,

Д.М. Гордиенко, И.М. Смолин // Пожарная безопасность. – 2005. – № 1. – С. 40-49.

31. Молчанов, В.П. Пожарная безопасность объектов добычи нефти и газа [Текст]: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук 05.26.03 / Молчанов Виктор Павлович. – Москва, ФГУ ВНИИПО МЧС России. – 2005. – 207 с.

32. Шебеко Ю.Н., Оценка индивидуального и социального риска аварии с пожарами и взрывами для наружных технологических установок [Текст] / Ю.Н. Шебенко, А.П. Шевчук, В.А. Колосов, И.М. Смолин, Д.Р. Брилёв // Пожаровзрывобезопасность. – 1995. – Т. 4, № 1. – С. 21-29.

33. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий: Монография [Текст] / Авт. Коллектив И.А. Болодьян // М.: ВНИИПО, 2006. – 93 с.

34. Матвеев, А.В. Критерий эффективности управления пожарным риском при использовании средств аварийной эвакуации [Текст] / А.В. Матвеев, М.В. Иванов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2011. – № 6-2 (138). – С. 165-170.

35. Однолько, А.А. Влияние характеристик систем противопожарной защиты на пожарные риски [Текст] / А.А. Однолько, И.В. Ситников // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. – 2010. – № 1. – С. 205-211.

36. Федорец, А.Г. Основные направления совершенствования системы обеспечения пожарной безопасности на основе методологии управления пожарными рисками [Текст] / А.Г. Федорец // Пожаровзрывобезопасность. – 2009. – № 9 (18). – С. 22-30.

37. Кривцов, Ю.В. Пожарные риски: история развития и пути совершенствования [Текст] / Ю.В. Кривцов, А.К. Микеев, Д.Г. Пронин // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2009. – № 6. – С. 68-72.

38. Минаев, В.А. Оценка вероятности возникновения пожаров при нарушениях требований пожарной безопасности [Текст] / В.А. Минаев, С.Н.

Тростянский, Чу Куок Минь // Технологии техносферной безопасности: интернетжурнал. – 2013. – № 5 (51) – С. 62-70.

39. Матюшин, А.В. Территориальное распределение кадровых ресурсов противопожарной службы на основе подходов теории активных систем [Текст] / А.В. Матюшин, В.А. Минаев, А.И. Овсяник, В.В. Симаков, Н.Г. Топольский, К.М. Чу // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – № 25 (12). – С. 46-54.

40. Оськин, А.А. Возможные подходы к обоснованию критериев приемлемого риска [Текст] / А.А. Оськин, Б.А. Анфилофьев // Сб. статей. – Самара: СамГАПС. – 2005. – С. 132-135.

41. Моторыгин, Ю.Д. Математическое моделирование процессов возникновения и развития пожаров: Монография [Текст] / Под общ. ред. В.С. Артамонова. – СПб.: СПб ун-т ГПС МЧС России, 2011. – 184 с.

42. Воронов, С.П. Применение риск-ориентированного подхода в деятельности органов государственного пожарного надзора [Текст] / С.П. Воронов // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 2016. – № 1. – С. 130-140.

43. Якуш, С.Е. Анализ пожарных рисков. Часть I: Подходы и методы [Текст] / С.Е. Якуш, Р.К. Эсманский // Проблемы анализа риска. – 2009. – Т. 6, № 3. – С. 8-46.

44. Грачев, В.Ю. ТР - 5049 Оценка пожарного риска. Обзор зарубежных источников [Электронный ресурс] / В.Ю. Грачев // Екатеринбург: СИТИС, 2010 – 209 с. – URL: <https://docplayer.ru/49633601-Ocenka-pozharnogo-riska.html>

45. Здор, В.Л. Пожарная сигнализация [Текст] / В.Л. Здор, М.А. Землемеров, К.А. Попонин, И.В. Рыбаков // Пожарная безопасность. – 2012. – № 2. – С. 41-49.

46. Шубинский, И.Б. Методы обеспечения функциональной надежности программ [Текст] / И.Б. Шубинский // Надежность. – 2014. – № 4. – С. 87-101.

47. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования: Свод правил: Утв. приказом МЧС РФ от 25 марта 2009. № 175.

48. Киракосян, Р.С. Мультикритериальные и мультисенсорные пожарные извещатели [Текст] / Р.С. Киракосян, П.В. Капустин, А.А. Легейда, Т.А. Буцынская // Академия Государственной противопожарной службы МЧС России (Материалы V Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов). – 2017. – С. 130-132.

49. Thomas, I.R. Effectiveness of Fire Safety Components and Systems [Текст] / I.R. Thomas // Journal of Fire Protection Engineering, Society of Fire Protection Engineers. – May 2002. – Vol. 12. – No. 2. – P. 151-162.

50. Milke, J. Effectiveness and Reliability of Fire Protection Systems [Текст] / James A. Milke // Protection Engineering magazine. – 2014. – Vol 64. – P. 44-52.

51. Кучера, Л.Я. Анализ надежности автоматизированных систем обеспечения пожарной безопасности [Текст] / Л.Я. Кучера, М.В. Иванникова // Инновационные научные исследования: теория, методология, практика. Сборник статей VIII международной научно-практической конференции: в 2 частях. – 2017. – С 57- 61.

52. Похабов, Ю.П. Обеспечение надежности уникальных высокоответственных систем [Текст] / Ю.П. Похабов // Надежность. – 2017. – Т. 17, № 3 (62). – С. 17-23.

53. Шубинский, И.Б. Систематический подход к защите программного обеспечения от сбоев аппаратуры [Текст] / И.Б. Шубинский, Х. Шебе // Надежность. – 2014. – № 3 (50). – С. 97-107.

54. Петрова, Д.А. Анализ и моделирование технологических и производственных процессов при наступлении чрезвычайных ситуаций на примере системы пожарной сигнализации [Текст] / Д.А. Петрова // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (cad/cam/pdm - 2016): труды XVI-ой международной молодежной конференции. – 2016. – С. 291-293.

55. Лебедева, М.И. Комплекс технических средств автоматизированной системы управления противопожарной защитой технологической установки первичной переработки нефти [Текст] / М.И. Лебедева, А.В. Федоров, Е.Н. Ломаев,

А.В. Богданов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2015. – № 2. – С. 20-25.

56. Федоров, А.В. Автоматизация систем противопожарной защиты технологических процессов обеспечения функционирования спортивных сооружениях [Текст] / А.В. Федоров, Е.Н. Ломаев, Ф.В. Демёхин // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – № 2 (60). – С. 49-55.

57. Галиакбаров, В.Ф. Построение интеллектуальной системы обнаружения несанкционированных скачков давления в магистральных трубопроводах для поддержания промышленной и пожарной безопасности [Текст] / В.Ф. Галиакбаров, В.Д. Ковшов, Э.В. Галиакбарова, З.М. Нагаева // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефтепродуктов: науч.– техн. журн. – 2015. – № 2. – С. 188-195.

58. Белозеров, В.В. Метод и автоматизированный комплекс обнаружения, предотвращения и тушения торфяных пожаров [Электронный ресурс] / В.В. Белозеров, А.А. Нестеров, Ю.Г. Плахотников, Ю.В. Прус // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». – 2010. – № 5 (33). – URL: <http://ipb.mos.ru/ttb/>

59. Замышляев, А.М. Совершенствование системы управления содержанием эксплуатационной инфраструктуры с применением современных информационных технологий [Текст] / А.М. Замышляев, Г.Б. Прошин // Надежность. – 2009. – № 4 (31). – С. 14-22.

60. Гапанович, В.А. Математическое и информационное обеспечение системы УРРАН [Текст] / В.А. Гапанович, А.М. Замышляев, И.Б. Шубинский // Надежность. – 2013. – № 1. – С. 3-11.

61. Пянзина, Ю.А. Моделирование чрезвычайных ситуаций техногенного характера / Ю.А. Пянзина // Наука XXI века: технологии, управление, безопасность: сборник материалов I международной научно-практической конференции. – Курган. – 2017. – С. 193-198.

62. Шайдулина, А.Ф. Анализ риска аварий и ЧС на установке крекинга в программном комплексе «ТОКСИ+Risk» [Текст] / А.Ф. Шайдулина // Проблемы науки. – Иваново. изд. Олимп. – 2017. – С. 35-37.

63. Брюхов, Е.Н. и др.; под общ. ред. Мокроусовой О.А. Прикладные программы для расчета пожарного риска [Текст] / Е.Н. Брюхов и др. под общ. Ред. О.А. Мокроусовй // Редакционно-издательский отдел Уральского института ГПС МЧС России. – 2017. – 154 с.

64. Сусоева, И.В. Оценка пожарного риска на объекте с массовым пребыванием людей с использованием программы «СИТИС: ФЛОУТЕК 2.23» [электронный ресурс] / И.В. Сусоева, Г.К. Букалов, И.А. Спиридонов // Научный вестник костромского государственного технологического университета. – 2012. – №1 – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17868633>.

65. Победная, В.Э. Использование программы СИТИС: ФЛОУТЕК 4.12 для расчета пожарного риска [текст] / В.Э. Победная, С.А. Гузеева // Информационные и графические технологии в профессиональной и научной деятельности – 2017. – С. 102-106.

66. Крик, Е.С. СИГМА ПБ – оптимальный сфот для расчета пожарных рисков [текст] / Е.С. Крик // Безопасность зданий и сооружений – 2017. – № 1. – С. 43-44.

67. Кирик, Е.С. О применении программного комплекса "СИГМА ПБ" для расчета вероятности эвакуации из здания [текст] / Е.С. Кирик, К.Ю. Литвинцев, Е.Б. Харламов // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). – 2014. – № 4 (12) – С. 53-61.

68. Литвинцев, К.Ю. Проблемы применения численного моделирования при определении расчетных величин пожарного риска [текст] / К.Ю. Литвинцев, Е.С. Крик, Е.А. Ягодка // Вычислительные технологии. – Новосибирск: Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН. – 2019. – № 4. – С. 56-69.

69. Карькин, А.Н. Особенности расчета пожарного риска трубопроводов с горючими жидкостями в программе PROMRISK [текст] / А.Н. Карькин, Н.А. Контарь, С.В. Субачев, А.А. Субачева // Актуальный проблемы пожарной безопасности. Материалы XXXI Международной научно-практической конференции Международной салон «Комплексная безопасность 2019». – 2019. – С. 169 – 172.

70. Кокорин, В.В. Применение программного обеспечения promrisk при моделировании аварий на АЗС [текст] / В.В. Кокорин, С.В. Субачев, Ю.В. Мельниченко, Ф.Ш. Хафизов, И.Ф. Хафизов // Техносферная безопасность. – Екатеринбург.: 2018. – № 4 (21). – С. 82-87.

71. Дегтярев, В.А. Обзор и анализ программных продуктов для расчета пожарных рисков в зданиях сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности [текст] / В.А. Дегтярев, Е.В. Скоробогатов, С.М. Кяшенко // Приоритетные направления развития системы обеспечения пожарной безопасности объектов защиты и территорий. Сборник трудов I Международной научно-практической конференции 2018. – 2018 – С. 29-33.

72. Назаров, В.П. Автоматизированная оценка зон воздействия опасных факторов пожаров на наружных технологических установках [Электронный ресурс] / В.П. Назаров, Т.Н. Атаманов // Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал. – 2013. – № 6 (52). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2013-6/21-06-13.ttb.pdf>

73. Рюманюк, Е.В. влияние специфики проектирования аспирационных систем на взрывопожарную опасность и расчетное значение пожарного риска [текст] / Е.В. Рюманюк, Д.В. Каргашилов, А.В. Федеров // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России (Современные проблемы гражданской защиты). – 2017. – № 3 (24). – С. 81-85.

74. Федеров, А.В. Повышение уровня пожаровзрывобезопасности нефтеперерабатывающих технологических процессов путём анализа и управления рисками / А.В. Федоров, А.М. Алешков, М.И. Лебедева // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. - 2013. – № 2. – С. 34-37.

75. Гапанович, В.А. Обеспечивать надежную работу технических средств [Текст] / В.А. Гапанович // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 9. – С. 2-5.

76. Гапанович, В.А. Некоторые вопросы управления ресурсами и рисками на железнодорожном транспорте на основе состояния эксплуатационной надежности и безопасности объектов и процессов (проект УРРАН) [Текст] / В.А.

Гапанович, А.М. Замышляев, И.Б. Шубинский // Надежность. – 2011. – № 1 (36). – С. 2-5.

77. Гапанович, В.А. Построение и использование матриц рисков в системе управления рисками на железнодорожном транспорте [Текст] / В.А. Гапанович, А.М. Замышляев, И.Б. Шубинский // Надежность. – 2011. – № 4 (39). – С. 56-58.

78. Гапанович, В.А. Система адаптивного управления техническим содержанием инфраструктуры железнодорожного транспорта (проект УРРАН) [Текст] / В.А. Гапанович, И.Б. Шубинский, Е.Н. Розенберг, А.М. Замышляев // Надежность. – 2015. – № 2 (53). – С. 56-58.

79. Новожилов, Е.О. Принцип построения матриц рисков [Текст] / Е.О. Новожилов // Надежность. – 2015. – № 3 (54). – С. 73-86.

80. Лисенков, В.М. Понятийный аппарат теории безопасности железнодорожных перевозок. Учебное пособие [Текст] / В.М. Лисенков, А.В. Лисенков // М.: Московский гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ), ин-т систем упр., телекоммуникаций и электрификации, каф. «Автоматика и телемеханика на ж.-д. трансп.». – 2010. – 28 с.

81. Шубинский, И.Б. Структурная надежность информационных систем. Методы анализа [Текст] / И.Б. Шубинский // Ульяновск: Областная типография «Печатный двор», 2012. – 216 с., ил.

82. Шубинский, И.Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа [Текст] / И.Б. Шубинский // Ульяновск: Областная типография «Печатный двор», 2012. – 296 с., ил.

83. Шубинский, И.Б. Графовый метод оценки производственной безопасности на объектах железнодорожного транспорта [Текст] / И.Б. Шубинский, А.М. Замышляев, О.Б. Проневич // Надежность. – 2017 – Т. 17, № 1 (60). – С. 40-45.

84. Проневич, О.Б. Алгоритм расчета и прогнозирования показателей функциональной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст] / О.Б. Проневич, В.Э. Швед // Надежность. – 2018. – Т. 18, № 3 (66). – С. 46-55.

85. Персианов, В.В. Российский железные дороги на рубеже столетий (ситуационный анализ) [Текст] / В.В. Персианов, А.И. Жданов // Вестник университета. – М.: – 2016. – № 2. – С. 89-93.

86. Гапанович, В.А. Система управления техногенными рисками в ОАО «РЖД» [Текст] / В.А. Гапанович, И.Б. Шубинский, О.Б. Проневич, В.Э. Швед // Железнодорожный транспорт. – 2017 г. – № 12 – С. 34 – 40.

87. Шубинский, И.Б. Особенности оценки вероятности возникновения пожара на тепловозах различных серий [Текст] / И.Б. Шубинский, О.Б. Проневич, А.Д. Данилова // Железнодорожный транспорт. – 2016. – Т.16, № 4. – С. 58-63.

88. Горяинов, В. Б. Математическая статистика: Учеб. для вузов. [Текст] / В. Б. Горяинов, И. В. Павлов, Г. М. Цветкова и др // М.: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 424 с.

89. Шор, Я. Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности [Текст] / Я.Б. Шор // М.: Советское радио, 1962. – 553 с.

90. Печкин, А. В. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. 2-е изд. [Текст] / А. В. Печкин, О. И. Тескин, Г. М. Цветкова и др. // Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2001. – 456 с.

91. Пиотровский, Р. Г. Математическая лингвистика. Учеб. пособие для пед. Институтов [Текст] / Р. Г. Пиотровский, К. Б. Бектаев, А. А. Пиотровская // – М.: Высшая школа, 1977. – 383 с.

92. Пятницкий, А. М. Оценка вероятности события по частоте его появления [Электронный ресурс] / А. М. Пятницкий// URL: [http://bioinformatics.ru/Data-Analysis/prob\\_estimate.html](http://bioinformatics.ru/Data-Analysis/prob_estimate.html)

93. Орлов, А.И. Эконометрика [Текст] / А.И. Орлов // М.: издательство «Экзамен», 2002 – 576 с.

94. Лемешко, Б.Ю. Сравнительный анализ мощности критериев согласия при близких конкурирующих гипотезах. I. Проверка простых гипотез [Текст] / Б.Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2008. – Т. 11, № 2 (34). – С. 96-111.

95. Замышляев, А.М. Автоматизация процессов комплексного управления техническим содержанием инфраструктуры железнодорожного транспорта [Текст]: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук 05.13.06 / Замышляев Алексей Михайлович // Москва, МГУПС (МИИТ). – 2013. – 340 с.

96. Гапанович, В.А. Оценка пожарных рисков тягового подвижного состава в условиях неполной информации [Текст] / В.А. Гапанович, О.Б. Проневич // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 11. – С. 58 – 63.

97. Распоряжение ОАО «РЖД» от 27.07.2010 N 1613р «О внесении изменений в «Нормативы трудоемкости технического обслуживания ТО-3 и текущего ремонта локомотивов в условиях структурных подразделений ОАО «РЖД» и «Нормативы трудоемкости технического обслуживания и текущего ремонта локомотивов серии ТЭМ-18Д, ТГ-16, 2ЭС5К, 3ЭС5К, Э5К в условиях депо ОАО «РЖД»».

98. Распоряжение ОАО «РЖД» от 19.01.2006 N 93р «Об утверждении нормативов трудоемкости на средний и капитальный ремонт локомотивов, выполняемый на заводах – филиалах ОАО «РЖД» (Вместе с Нормативами).

99. Орлов, А.И. Нечисловая статистика [Текст] / А.И. Орлов // М: Изд. МЗ-Пресс. – 2004 г. – 513 с.

100. Горский, В.Г. Метод согласования кластеризованных ранжировок [Текст] / В.Г. Горский, А.А. Гриценко, А.И. Орлов // Автоматика и телемеханика. – 2000. – № 3. – С. 159-167.

101. Кончин, И.В. Совершенствование метода экспертных оценок при составлении списка лекарственных препаратов для оказания экстренной медицинской помощи в условиях чрезвычайных ситуаций [Текст] / И.В. Кончин, С.В. Горпенко, Д.А. Трошин // Медицина катастроф. М.: – 2015. – № 2 (90) – С. 22-25.

102. Пат. №2674216 Российская Федерация. СПК G06Q 90/00 (2018.08) Способ определения пожарной опасности технических объектов железнодорожного транспорта и система для его реализации / Вихрова Н. Ю.,

Гапанович В.А., Проневич, Розенберг И.Н., Розенберг Е.Н., Швед В.Э., Шубинский И.Б.; заявитель и патентообладатель АО «НИИАС» – № 2017141007, заявл. 24.11.2017, опубл. 05.12.2018, Бюл. № 34. – 24 с.

103. Colman, A. Comparing rating scales of different length: equivalence of scores from 5-point and 7-point scales / A. Colman, C. Norris, C. Preston // Psychological Reports. – 1997. – N 80, p. 355-362.

104. Рожков, Н. Н. Система перезачета оценок успеваемости – инструмент поддержки академической мобильности [Текст] / Н. Н. Рожков // Университетское управление: практика и анализ. – 2006. – № 5. – С. 104 – 113.

105. Айвазян, С. А. О подходах к сопоставлению рейтинговых шкал [Текст] / С.А. Айвазян, С.В. Головань А.М. Карминский, А.А. Пересецкий // Прикладная эконометрика. – 2011. – № 3 (23). – С. 20-21.

106. Шубинский, И.Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза [Текст] / И.Б. Шубинский // М: ООО «Журнал Надежность». – 2016 – 544 с.

107. Герцог, Г.А. Основы научного исследования: методология, методика, практика. Учебное пособие [Текст] / Г.А. Герцог // Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та. – 2013. – 208 с.

108. Голубев, С.В. Распознавание структурированных документов на основе машинного обучения / С.В. Голубев // Бизнес – Информатика. – 2011. - № 2 (16). – С. 48-55.

109. Носков, Д.М. Классификация текстов при помощи алгоритмов машинного обучения / Д.М. Носков // Вестник науки и образования. – 2018. – Т. 2, № 4 (40). – с. 39-41.

110. Ken-ichi Fukui Cluster sequence mining from event sequence data and its application to damage correlation analysis [Электронный ресурс]/ Author links, Yoshiyuki Okada, Kazuki Satoh, Masayuki Numao // Knowledge-Based Systems. – 2019. – pp. 136-144. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705119302187>

111. Inaba D. Co-occurring cluster mining for damage patterns analysis of a fuel cell / Inaba D., Fukui K., Sato K., Mizusaki J., Numao M. // Proc. of the 16th Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data . – 2012. – pp. 49-60.

112. Mai Le Sequential Clustering for Event Sequences and Its Impact on Next Process Step Prediction [Электронный ресурс] / Mai Le, Detlef Nauck, Bogdan Gabrys, Trevor Martin // 15th International Conference Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems. Part 1 – 2014. – pp. 168-178. – Режим доступа: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-08795-5\\_18](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-08795-5_18)

113. Проневич, О.Б. Методы анализа пожарной безопасности тягового подвижного состава / О.Б. Проневич // Надежность. – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 48 - 55.

114. Кузнецов, К.Б. Оценка на основе теории нечетких множеств эффективности защитных заземляющих устройств при эксплуатации контактной сети [Текст] / К.Б. Кузнецов, А.А. Пазуха // Вестник УрГУПС. – 2019. – № 4 (44). – С. 101-111.

115. Шаталова, А.Ю. Усовершенствованная пятифакторная модель Альтмана для оценки кредитоспособности предприятия с нечеткими экономическими показателями [Текст] / А.Ю. Шаталова, И.В. Шевченко, Б. Бамадио, К.А. Лебедев // Computational nanotechnology. – Москва, 2020. – № 1. – С. 72-83.

116. Байбурин А.Х. Оценка качества строительства при недостатке информации [Текст] / А.Х. Байбурин // Архитектура, градостроительство и дизайн. – 2018. – № 3. – С. 17-22.

117. Ажмухамедов, И.М. Выбор стратегии технического обслуживания и ремонта оборудования сетей связи на предприятиях нефтегазового комплекса [Текст] / И.М. Ажмухамедов, Ю.А. Гостюхин // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 2. – С. 74.

118. Доронин, С.В. Развитие информационного обеспечения анализа уязвимостей и факторов снижения конструкционной безопасности [Текст] /

С.В. Доронин, Е.М. Рейзмунт // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2016. – № 5. – С.16-22.

119. Кабанов, В.А. Использование метода конкордации в оценке уровня согласованности экспертных мнений [Текст] / В.А. Кабанов, Е.С. Комарова // Реакция региональной экономики на внешние вызовы: материалы межвузовской научно-практической конференции / Владимир.: Владимирский филиал РАНХиГС. – 2016. – С. 39-42.

120. Проневич, О.Б. Автоматизированная система прогнозирования пожарной безопасности объектов железнодорожного транспорта на основе оценки рисков [Текст] / О.Б. Проневич, И.Б. Шубинский // Надежность. – 2019. – № 19 (1). – С. 48-53.

121. Карманов, А.В. Реализация принципа ALARP при синтезе многоканальной системы противоаварийной защиты [Текст] / А.В. Карманов, А.С. Телюк, К.П. Шершукова // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2014. – № 6. – С. 34-60

122. Ёрж, А.Е. Методология управления рисками в хозяйстве автоматики и телемеханики [Текст] / А.Е. Ёрж, А.В. Горелик, А.В. Орлов, Д.В. Солдатов // Автоматика, связь, информатика. – 2017. – № 7. – С. 2-6.

123. Аксютин, В.П. Обеспечение пожарной безопасности в ОАО «РЖД» [Текст] / В.П. Аксютин // М: Пожарная безопасность в строительстве. – 2010. – № 6. – С. 28-31.

124. Проневич, О.Б. Разработка математической модели оценки эффективности систем обеспечения пожарной безопасности стационарных объектов [Текст] / О.Б. Проневич // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80, № 7. – С. 67-72.

125. Проневич, О.Б. Анализ пожарных рисков на постах электрической, диспетчерской и горочной централизации ОАО «РЖД» / О.Б. Проневич, А.В. Лохач, В.Э. Швед // Материалы V международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2016». – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2016. – С. 34-37.

126. Данилова, А.Д. Анализ пожарной безопасности тягового подвижного состава и оценка пожарных рисков [Текст] / А.Д. Данилова, О.Б. Проневич, А.В. Лохач // Материалы V международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2016» – М: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 13-16.

127. Швед, В.Э. Аудит пожарной безопасности тягового подвижного состава и оценка риска по фактическому состоянию [Текст] / В.Э. Швед, О.Б. Проневич // Материалы VI-й международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2017». – М: Академия ГПС МЧС России, 2017. – С. 545-459.

128. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников [Текст] / А.И. Кобзарь // М.: Физматлит, 2006. — С. 484-486. — 816 с.

129. Айвазян, С.А. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное изд. [Текст] / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. // М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.

130. Романюк, А.Г. Анализ динамических рядов заболеваемости менингококковой инфекцией населения г. Минска с использованием метода восходящих и нисходящих серий [Текст] / А. Г. Романюк, Р.А. Дудинская, С.А. Лаптенко, С.Ф. Кретьова // Вопросы автоматизации и информатизации здравоохранения. Изд.: государственное учреждение «Республиканский научно-практический центр медицинских технологий, информатизации, управления и экономики здравоохранения» (Минск). – 2009. – № 4 (61). – С. 77-80.

131. Плотников, А.Н. Об инвариантах структуры серий и критериях случайности последовательной выборки [Текст] / А.Н. Плотников // Известия Самарского научного центра РАН. 2006. – Т.8, №4. – С. 1142-1147.

132. Ахо, А. Построение и анализ вычислительных алгоритмов. Монография [Текст] / А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман // М.: Изд. Мир, 1979. – 536 с.

## Приложение А Результаты статистических исследований и экспертных оценок пожарной опасности объектов железнодорожного транспорта

### А.1 Анализ закономерности появления количества пожаров на стационарных и передвижных объектах железнодорожного транспорта

При применении к случаям пожаров на объектах железнодорожного транспорта статистических методов анализа данных докажем, что пожар – величина случайная. Для доказательства выбран критерий «восходящих» и «нисходящих» серий [129, 130, 131]. Исходными данными являются последовательные результаты наблюдений – выбора вида  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . К выборке применяются следующие правила присвоения знаков серии: если  $x_{i+1} - x_i > 0$ , то на  $i$ -м месте последовательности значений выборки ставится знак «+», если же  $x_{i+1} - x_i < 0$ , то на  $i$ -м месте последовательности значений выборки ставится знак «-». Последовательность подряд идущих плюсов свидетельствует о возрастании результатов наблюдений, а последовательность минусов – об убывании.

Основанием критерия является то, что если выборка случайна, то в образованной последовательности знаков общее число серий не может быть слишком малым, а их протяженность слишком большой. При уровне значимости  $0,050 < \alpha < 0,0975$ , количественное выражение критерия имеет вид:

$$v(n) > \left[ \frac{1}{3} (2n - 1) - 1,96 \sqrt{\frac{16n-29}{90}} \right] \quad (A.1)$$

$$\tau(n) < \tau_0(n)$$

где  $v(n)$  – общее число серий;

$\tau(n)$  – количество подряд идущих плюсов или минусов в самой длинной серии;

$\tau_0(n)$  – значение зависит от  $n$ .

$\tau_0(n)$	$n$
5	$n \leq 26$
6	$26 < n \leq 153$
7	$153 < n \leq 1170$

Если хотя бы одно из неравенств А.1 окажется нарушенным, то гипотезу о случайности выборки необходимо отклонить.

Применив данный критерий, докажем случайность пожаров для объектов железнодорожного транспорта.

#### **А.1.1 Анализ закономерности появления пожаров на тяговых подстанциях ОАО «РЖД»**

В Таблицах А.1.1 и А.1.2 приведена статистика пожаров на тяговых подстанциях ОАО «РЖД» с 2011 по 2016 г.

Таблица А.1.1 – Статистика пожаров на тяговых подстанциях

Год	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2011	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0
2012	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2013	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2014	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0
2015	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0

Таблица А.1.2 – Статистика пожаров на тяговых подстанциях железнодорожного транспорта по годам

Год	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Кол-во пожаров	4	1	3	3	1	2

Проверка закономерности количества пожаров осуществляется на основе статистики пожаров по годам, Таблица А.1.3.

Таблица А.1.3 – Присвоение знаков серии

Количество пожаров в год	Знак
4	
1	-
3	+
3	Не учитывается
1	-
2	+

Даная последовательность характеризуется количеством серий  $v(n) = 4$  и самой продолжительной серией  $\tau(n) = 1$ .

$$\tau_0(n) = 5, \text{ при т.к. } n = 6 \leq 26$$

$$v(n) = 4 > \frac{1}{3}(2 \cdot 6 - 1) - 1,96 \sqrt{\frac{16 \cdot 6 - 29}{90}} = 1,97$$

$$t(n) = 1 < 5$$

Оба неравенства выполняются. Таким образом, гипотеза о наличии тренда отвергается, следовательно, пожар на тяговой подстанции – случайное событие.

### А.1.2 Анализ закономерности появления пожаров на тяговом подвижном составе

Для примера отразим расчет на статистике пожаров по тепловозам серии 2ТЭ116 за 2011-2015 гг., Таблица А.1.4. Присвоение знаков приведено в Таблице А.1.5.

Таблица А.1.4 – Статистика пожаров на тепловозах 2ТЭ116 по месяцам

Год	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2011	1	0	0	0	2	1	0	1	0	1	0	0
2012	1	1	3	2	0	1	0	3	0	0	1	0
2013	1	1	1	1	0	1	2	1	1	0	3	1
2014	1	1	2	0	2	0	0	2	0	1	0	0
2015	0	0	1	0	1	0	3	1	0	0	2	2

Таблица А.1.5 – Присвоение знаков

Месяц	Кол-во пожаров	Знак	Месяц	Кол-во пожаров	Знак
1	1		31	2	+
2	0	-	32	1	-
3	0		33	1	+
4	0		34	0	-
5	2	+	35	3	+
6	1	-	36	1	-
7	0	-	37	1	
8	1	+	38	1	
9	0	-	39	2	+
10	1	+	40	0	-
11	0	-	41	2	+
12	0		42	0	-

13	1	+	43	0	
14	1	+	44	2	+
15	3	+	45	0	-
16	2	-	46	1	+
17	0	-	47	0	-
18	1	+	48	0	
19	0	-	49	0	
20	3	+	50	0	
21	0	-	51	1	+
22	0		52	0	-
23	1	+	53	1	+
24	0	-	54	0	-
25	1	+	55	3	+
26	1		56	1	-
27	1		57	0	-
28	1		58	0	
29	0	-	59	2	+
30	1	+	60	2	+

Даная последовательность характеризуется количеством серий  $v(n)=38$  и самой продолжительной серией  $\tau(n) = 3$ .

$$\tau_0(n) = 6, \text{ при т.к. } 26 < 60 \leq 153$$

$$v(n) = 38 > \frac{1}{3}(2 \cdot 60 - 1) - 1,96 \sqrt{\frac{16 \cdot 60 - 29}{90}} = 33,3, \quad t(n) = 3 < 6,$$

Оба неравенства выполняются. Таким образом, гипотеза о наличии тренда отвергается, следовательно, пожар на тяговом подвижном составе – случайное событие.

### А.1.3 Анализ закономерности появления пожаров на постах ЭЦ

В Таблице А.1.6 приведена статистика появления пожаров на постах электрической централизации, в Таблице А.1.7 – результаты присвоения знаков.

Таблица А.1.6 – Статистика пожаров на постах ЭЦ по месяцам за 2011-2014 гг.

Год	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2010	1	1	1	0	0	0	0	2	0	1	0	1
2011	3	1	1	1	1	0	1	1	1	2	1	1
2012	2	1	0	3	2	0	4	0	0	2	1	2
2013	1	0	1	2	0	1	0	0	1	1	0	1
2014	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1

Таблица А.1.7 – Присвоение знаков

Месяц	Кол-во пожаров	Знак	Месяц	Кол-во пожаров	Знак
1	1		31	4	+
2	1	+	32	0	-
3	1		33	0	
4	0	-	34	2	+
5	0		35	1	-
6	0		36	2	+
7	0		37	1	-
8	2	+	38	0	+
9	0	-	39	1	-
10	1	+	40	2	+
11	0	-	41	0	-
12	1	+	42	1	+
13	3	+	43	0	-
14	1	-	44	0	
15	1		45	1	+
16	1		46	1	
17	1		47	0	-
18	0	-	48	1	+
19	1	+	49	0	-
20	1		50	0	
21	1		51	0	
22	2	+	52	1	+
23	1	-	53	0	-
24	1		54	1	+
25	2	+	55	0	-
26	1	-	56	0	
27	0	-	57	1	+
28	3	+	58	0	-
29	2	-	59	1	+
30	0	-	60	1	

Данная последовательность характеризуется количеством серий  $v(n)=38$  и самой продолжительной серией  $t(n) = 2$ .

$$\tau_0(n) = 6, \text{ при т.к. } 26 < 60 \leq 153$$

$$v(n) = 38 > \frac{1}{3}(2 \cdot 60 - 1) - 1,96 \sqrt{\frac{16 \cdot 60 - 29}{90}} = 33,3$$

$$t(n) = 2 < 6$$

Оба неравенства выполняются. Таким образом, гипотеза о наличии тренда отвергается, следовательно, пожар на постах ЭЦ – случайное событие.

### А.1.4 Анализ закономерности появления пожаров на железнодорожных вокзалах

В Таблице А.1.8 приведена статистика появления пожаров на железнодорожных вокзалах, в Таблице А.1.9 – результаты присвоения знаков.

Таблица А.1.8 – Статистика пожаров на железнодорожных вокзалах общего пользования по месяцам за 2011-2017 гг.

Железная дорога	Кол-во ДЖВ	Количество пожаров в анализируемый период (год)						
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
ОКТ	17	2	1	0	2	0	0	0
В-СИБ	21	1	1	0	0	0	0	0
ГОРЬК	25	0	0	1	0	0	0	1
ДВОСТ	22	0	0	0	0	0	0	0
ЗАБ	16	0	0	0	0	1	0	0
З-СИБ	43	0	0	0	0	0	0	0
КБШ	29	0	1	0	0	0	0	0
КРАС	7	0	0	0	0	0	0	0
МОСК	16	0	0	0	2	1	0	0
ПРИВ	15	0	0	0	0	0	0	0
СВЕР	16	0	1	0	0	0	0	0
СЕВ	33	0	0	0	0	0	0	0
С-КАВ	56	0	0	0	1	0	0	0
Ю-ВОСТ	21	0	0	0	0	0	0	1
Ю-УР	20	0	1	1	0	0	0	0

Таблица А.1.9 – Проставление знаков

Год	Кол-во пожаров	Знак
2011	3	
2012	5	+
2013	3	-
2014	5	+
2015	2	-
2016	0	-
2017	2	+

Даная последовательность характеризуется количеством серий  $\nu(n)=5$  и самой продолжительной серией  $\tau(n) = 2$ .  $\tau_0(n) = 5$ , при т.к.  $n = 7 \leq 26$

$$v(n) = 5 > \frac{1}{3}(2 \cdot 7 - 1) - 1,96 \sqrt{\frac{16 \cdot 7 - 29}{90}} = 2,45$$

$$t(n) = 2 < 5$$

Оба неравенства выполняются. Таким образом, гипотеза о наличии тренда отвергается, следовательно, пожар на железнодорожных вокзалах – случайное событие.

## А.2 Пример графа состояний пожарной опасности бака масляного трансформатора тяговой подстанции и расчета вероятностей перехода в опасное состояние

Одним из наиболее пожароопасных объектов на ТП является масляный трансформатор [84]. На Рисунке А.2.1 приведен граф состояний бака масляного трансформатора, влияющих на вероятность появления пожароопасного отказа. При этом под множеством состояний понимается множество существенных свойств, которыми обладает система в данный момент времени [119, 132]. Перечень состояний приведен в Таблице А.2.1, в Таблице А.2.2 – переходные вероятности.

Таблица А.2.1- Перечень состояний бака масляного трансформатора, влияющих на пожарную безопасность

№	Состояние
Исправные состояния ( $S_H$ )	
1	Бак исправен
Дестабилизирующие состояния ( $S_{\text{риск}}$ )	
2	Неисправность контрольных средств
3	Не соблюден температурный режим
4	Некачественное масло
5	Проточка в баке
6	Перелив/недолив масла
7	Уровень масла выше нормы
8	Уровень масла ниже нормы
9	Течь масла имеется незначительная
10	Критическая течь масла
Пожароопасные состояния ( $\bar{S}_{\text{ПБ}}$ )	
11	Образование масляной пробки
12	Замыкание между обмотками
13	Скопление и нагрев масла
14	Скопление и нагрев масла в объеме, достаточном для загорания

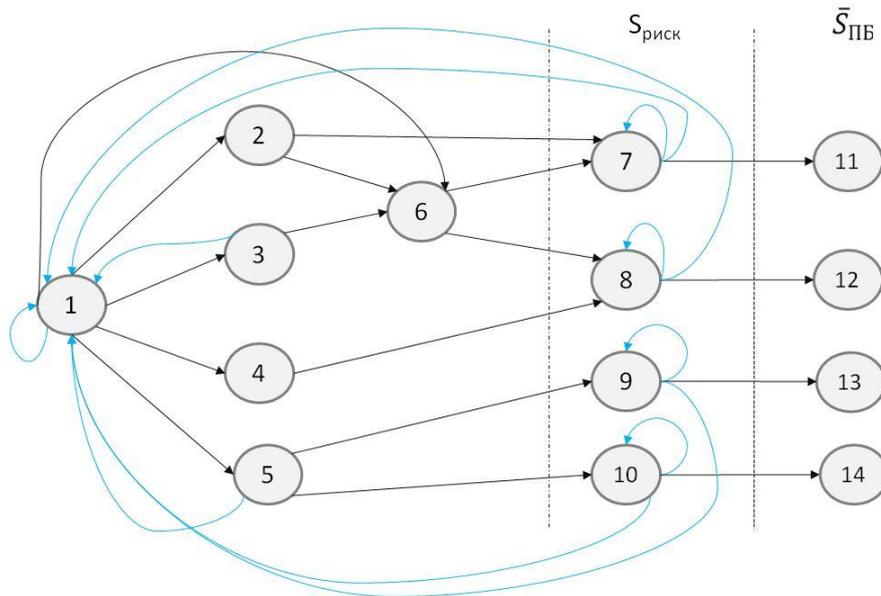


Рисунок А.2.1 – Состояния масляного бака трансформатора тяговой подстанции

Таблица А.2.2 – Переходные вероятности графа состояний масляного бака трансформатора

№ Состояния	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	$\Sigma$
1	0,025	0,05	0,05	0,025	0,8	0,05									1
2						0,6	0,4								1
3	0,2					0,8									1
4								1							1
5	0,05								0,05	0,9					1
6							0,5	0,5							1
7	0,75						0,17				0,08				1
8	0,62							0,35				0,03			1
9	0,76								0,2				0,04		1
10	0,5									0,15				0,35	1
11											1				1
12												1			1
13													1		1
14														1	1

Проведя расчёты, в соответствии с положениями, изложенными в параграфе 2.4.1.1 рассчитаем вероятности перехода системы из состояния множества предопасных состояний в опасные состояния:

$$b_{7-11} = \frac{0,08 \cdot 0,19}{0,134} = 0,1$$

$$b_{8-12} = \frac{0,03 \cdot 0,223}{0,134} = 0,05$$

$$b_{9-13} = \frac{0,04 \cdot 0,161}{0,134} = 0,05$$

$$b_{10-14} = \frac{0,35 \cdot 0,313}{0,134} = 0,8$$

### А.3 Оценка согласованности мнения экспертов при классификации пожароопасных состояний передвижных объектов железнодорожного транспорта

Для формирования перечня пожароопасных состояний была сформирована экспертная комиссия, включающая специалистов Проектно-конструкторского бюро Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД» (5 человек), Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД» (2 человека), специалистов Московской (2 человека), Октябрьской (1 человек) региональных дирекций тяги. Перед экспертами была поставлена задача анализа перечня возможных состояний пожарной опасности электрических и вспомогательных машин тепловоза и отнесения каждого состояния к одной из трёх категорий. Категории в порядке убывания пожарной опасности: 1-я категория, 2-я категория, 3-я категория. Таким образом задача экспертов сводится к ранжированию пожароопасных состояний. Т.к. каждый эксперт может присвоить один и тот же ранг нескольким состояниям, для оценки согласованности мнений экспертов [93, 100] будет использован коэффициент конкордации с корректировкой на связанные ранги [101]:

$$W = \frac{12 \cdot \sum_{i=1}^m (\sum_{j=1}^n r_{ij} - \bar{r})^2}{n^2(m^3 - m) - n \sum_{j=1}^n T_j}, \quad (\text{A.2})$$

где  $r_{ij}$  – ранг, поставленный  $i$ -му состоянию  $j$ -м экспертом;

$n$  – количество экспертов;

$m$  – количество состояний;

$T$  – корректировка на связанные ранги, рассчитывается по формуле:

$$T_j = \sum_{k=1}^{H_j} (h_k^3 - h_k), \quad (\text{A.3})$$

где  $h_k$  – число равных рангов  $k$ -й группе связанных рангов;

$k - H_j$  – число групп, связанных рангов у  $j$ -го эксперта.

Оценка согласованности мнения экспертов проводилась по следующему алгоритму:

1) формирование сводной таблицы с мнением экспертов о категориях пожароопасных состояний (Таблица А.3.1);



8	Наличие следов оплавления изоляции подводящих проводов электродвигателя масляного насоса	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	Наличие грязи и подтёков топлива на электродвигателе топливного насоса	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2
10	Наличие подгаров подводящих проводов электродвигателя топливного насоса	2	2	1	1	2	2	2	1	2	2
11	Наличие следов оплавления изоляции подводящих проводов электродвигателя топливного насоса	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2
12	Наличие трещин, сколов на валу двухмашинного агрегата	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3
13	Наличие подгаров подводящих проводов двухмашинного агрегата	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
14	Наличие следов оплавления изоляции подводящих проводов двухмашинного агрегата	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1

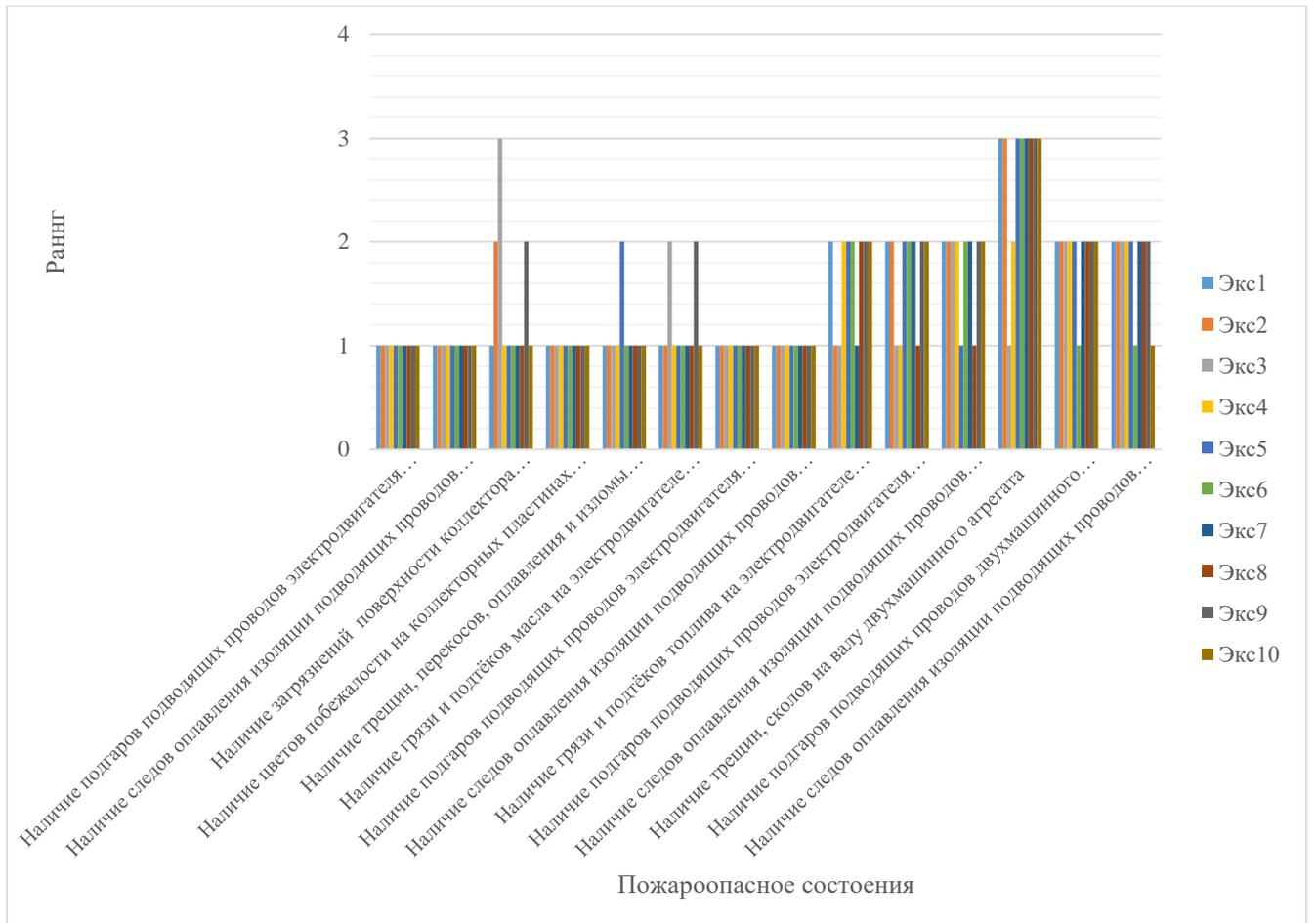


Рисунок А.3.1 – Мнения экспертов

Таблица А.3.2 – Пересчёт рангов

№	Состояние	Экс1	Экс2	Экс3	Экс4	Экс5	Экс6	Экс7	Экс8	Экс9	Экс10	$\sum_{j=1}^n r_{ij}$	$\bar{r}$	$(\sum_{j=1}^n r_{ij} - \bar{r})^2$
1	Наличие подгаров подводящих проводов электродвигателя калорифера	4,75	4,75	5	5	4,75	5,5	5	5,5	8,5	5	53,75	77,57	567,46
2	Наличие следов оплавления изоляции подводящих проводов электродвигателя калорифера	4,75	4,75	5	5	4,75	5,5	5	5,5	8,5	5	53,75	77,57	567,46
3	Наличие загрязнений поверхности коллектора двухмашинного агрегата	4,75	11	14	5	4,75	5,5	5	5,5	10	5	70,50	77,57	50,01
4	Наличие цветов побежалости на коллекторных пластинах двухмашинного агрегата	4,75	4,75	5	5	4,75	5,5	5	5,5	8,5	5	53,75	77,57	567,46
5	Наличие трещин, перекосов, оплавления и изломы щёткодержателя и щёток двухмашинного агрегата	4,75	4,75	5	5	11	5,5	5	5,5	8,5	5	60,00	77,57	308,76
6	Наличие грязи и подтёков масла на электродвигателе масляного насоса	4,75	4,75	11,5	5	4,75	5,5	5	5,5	10	5	61,75	77,57	250,32
7	Наличие подгаров подводящих проводов электродвигателя масляного насоса	4,75	4,75	5	5	4,75	5,5	5	5,5	8,5	5	53,75	77,57	567,46
8	Наличие следов оплавления изоляции подводящих проводов электродвигателя масляного насоса	4,75	4,75	5	5	4,75	5,5	5	5,5	8,5	5	53,75	77,57	567,46
9	Наличие грязи и подтёков топлива на электродвигателе топливного насоса	11	4,75	5	12	11	12	5	12	10	11,5	94,25	77,57	278,17

10	Наличие подгаров подводящих проводов электродвигателя топливного насоса	11	11	5	5	11	12	11,5	5,5	10	11,5	93,50	77,57	253,72
11	Наличие следов оплавления изоляции подводящих проводов электродвигателе топливного насоса	11	11	11,5	12	4,75	12	11,5	5,5	10	11,5	100,75	77,57	537,25
12	Наличие трещин, сколов на валу двухмашинного агрегата	14	14	5	12	14	14	14	14	14	14	129,00	77,57	2644,90
13	Наличие подгаров подводящих проводов двухмашинного агрегата	11	11	11,5	12	11	5,5	11,5	12	10	11,5	107,00	77,57	866,04
14	Наличие следов оплавления изоляции подводящих проводов двухмашинного агрегата	11	11	11,5	12	11	5,5	11,5	12	10	5	100,50	77,57	525,72

Таблица А.3.3 – Средние ранги

№ состояния	Средний ранг (среднее арифметическое)	Медиана	№ состояния	Средний ранг (среднее арифметическое)	Медиана
1	5	5	8	5	5
2	5	5	9	9	11
3	7	5	10	9	11
4	5	5	11	10	11
5	6	5	12	13	14
6	6	5	13	11	11
7	5	5	14	10	11

### Приложение Б Матрицы пожарных рисков стационарных и передвижных объектов ОАО «РЖД»

УРОВЕНЬ РИСКА		Уровень последствий			
Уровень возможности		Незначительный	Несущественный	Критический	Катастрофический
Частое	$0,7 \leq P_{\text{пожар}}$				
Вероятное	$0,5 < P_{\text{пожар}} \leq 0,7$				
Случайное	$10^{-1} < P_{\text{пожар}} \leq 0,5$				
Редкое	$10^{-3} < P_{\text{пожар}} \leq 10^{-1}$				
Крайне редкое	$10^{-6} < P_{\text{пожар}} \leq 10^{-3}$				
Маловероятное	$P_{\text{пожар}} \leq 10^{-6}$				
		$R \leq 300$	$300 < R \leq 500$	$500 < R < 3800$	$R \geq 3800$
		Уровень последствий R у.е.			

у.е. – тыс.р.

Рисунок Б.1 – Матрица пожарных рисков железнодорожных вокзалов

УРОВЕНЬ РИСКА		Уровень последствий			
Уровень возможности		Незначительный	Несущественный	Критический	Катастрофический
Катастрофический (частое событие)	$P_{\text{пожар}} > 2,15 \cdot 10^{-4}$	Допустимый	Нежелательный	Недопустимый	Недопустимый
Критический (вероятное событие)	$4,6 \cdot 10^{-5} < P_{\text{пожар}} \leq 2,15 \cdot 10^{-4}$	Допустимый	Нежелательный	Нежелательный	Недопустимый
Несущественный (случайное событие)	$10^{-5} < P_{\text{пожар}} \leq 4,6 \cdot 10^{-5}$	Допустимый	Допустимый	Нежелательный	Недопустимый
Несущественный (редкое событие)	$2,15 \cdot 10^{-6} < P_{\text{пожар}} \leq 10^{-5}$	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Нежелательный	Нежелательный
Незначительный (крайне редкое событие)	$4,6 \cdot 10^{-7} < P_{\text{пожар}} \leq 2,15 \cdot 10^{-6}$	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Допустимый	Нежелательный
Незначительный (маловероятное событие)	$P_{\text{пожар}} \leq 4,6 \cdot 10^{-7}$	Не принимаемый в расчет	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Нежелательный
		$R < 8,12$	$8,12 \leq R < 175$	$1757 \leq R < 3770$	$R \geq 377$
		Уровень последствий R в МРОТ			

Рисунок Б.2 – Матрица пожарных рисков информационно-вычислительных центров

Событие	Вероятность пожара	Уровень пожарного риска				
		Допустимый	Нежелательный	Недопустимый	Недопустимый	Недопустимый
Частое	$P > 2,55 \cdot 10^{-4}$	Допустимый	Нежелательный	Недопустимый	Недопустимый	Недопустимый
Вероятное	$1,2 \cdot 10^{-4} < P \leq 2,55 \cdot 10^{-4}$	Допустимый	Нежелательный	Нежелательный 3ТЭ10	Недопустимый	Недопустимый
Случайное	$5,57 \cdot 10^{-5} < P \leq 1,2 \cdot 10^{-4}$	Допустимый	Допустимый	Нежелательный	Недопустимый	Недопустимый
Редкое	$2,56 \cdot 10^{-5} < P \leq 5,57 \cdot 10^{-5}$	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Нежелательный 2М62 2ТЭ10	Нежелательный 2ТЭ116	Недопустимый
Крайне редкое	$1,23 \cdot 10^{-5} < P \leq 2,56 \cdot 10^{-5}$	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Допустимый ТЭМ2 ТЭП70	Нежелательный	Недопустимый
Маловероятное	$P \leq 1,23 \cdot 10^{-5}$	Не принимаемый в расчет Другие	Не принимаемый в расчет	Допустимый ЧМЭ3 ТЭМ7	Нежелательный	Нежелательный
Вид ремонта восстановления ТПС	ТО-2; ТО-3	ТР-1	ТР-2; ТР-3	ТР-2; ТР-3	СР; КР	Не подлежит восстановлению

Рисунок Б.3 – Матрица пожарных рисков тепловозов ОАО «РЖД» центрального уровня управления

Перечень серий тепловозов координаты пожарного риска «Другие» приведен в Таблице Б.1.

Событие	Вероятность пожара	Уровень пожарного риска				
		Допустимый	Нежелательный	Недопустимый	Недопустимый	Недопустимый
Частое	$P > 2,55 \cdot 10^{-4}$	Допустимый	Нежелательный	Недопустимый	Недопустимый	Недопустимый
Вероятное	$1,2 \cdot 10^{-4} < P \leq 2,55 \cdot 10^{-4}$	Допустимый	Нежелательный	Нежелательный	Недопустимый	Недопустимый
Случайное	$5,57 \cdot 10^{-5} < P \leq 1,2 \cdot 10^{-4}$	Допустимый	Допустимый	Нежелательный ВЛ85	Недопустимый	Недопустимый
Редкое	$2,56 \cdot 10^{-5} < P \leq 5,57 \cdot 10^{-5}$	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Нежелательный ВЛ11	Нежелательный	Недопустимый
Крайне редкое	$1,23 \cdot 10^{-5} < P \leq 2,56 \cdot 10^{-5}$	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Допустимый ЧС4, ВЛ60, ЧС7	Нежелательный ВЛ10, ВЛ80	Недопустимый
Маловероятное	$P \leq 1,23 \cdot 10^{-5}$	Не принимаемый в расчет Другие	Не принимаемый в расчет ЭПМ	Допустимый	Нежелательный	Нежелательный
Вид ремонта восстановления ТПС	ТО-2 ; ТО-3	ТО-2 ; ТО-3	ТР-1	ТР-2; ТР-3	СР; КР	Не подлежит восстановлению

Рисунок Б.4 – Матрица пожарных рисков электровозов ОАО «РЖД» центрального уровня управления

Перечень серий электровозов координаты пожарного риска «Другие» приведен в Таблице Б.1.

Таблица Б.1 - Реестр сетевых оценок пожарных рисков ТПС

Серия ТПС	Базовая вероятность возникновения пожара	Базовый уровень пожарного риска
Тепловозы		
2ТЭ116	$5,29 \cdot 10^{-5}$	Нежелательный
2ТЭ10	$3,2 \cdot 10^{-5}$	Нежелательный
3ТЭ10	$1,98 \cdot 10^{-4}$	Нежелательный
ТЭМ2	$1,31 \cdot 10^{-5}$	Допустимый
ТЭП70	$2,1 \cdot 10^{-5}$	Допустимый
ТЭМ7	$1,69 \cdot 10^{-6}$	Допустимый
2М62	$2,99 \cdot 10^{-5}$	Нежелательный
ЧМЭ3	$6,27 \cdot 10^{-6}$	Допустимый
Другие: 2ТЭ25 в/и ТЭМ14, ТЭМ18ДМ в/и ТУ2, ТУ-8Г	$10^{-6}$	Не принимаемый в расчет
Электровазы		
ВЛ10	$1,99 \cdot 10^{-5}$	Нежелательный
ВЛ11	$4,69 \cdot 10^{-5}$	Нежелательный
ВЛ60	$1,77 \cdot 10^{-5}$	Допустимый
ВЛ80	$1,29 \cdot 10^{-5}$	Нежелательный
ВЛ85	$7,5 \cdot 10^{-5}$	Нежелательный
ЧС2	$1,37 \cdot 10^{-5}$	Допустимый
ЧС4	$2,09 \cdot 10^{-5}$	Допустимый
ЭП1М	$2,65 \cdot 10^{-6}$	Не принимаемый в расчет
Другие: 4/2ЭС10, 2/3ЭС4К, 2/3/4ЭС5В/И 2ЭС6, , 2ЭС7, ЧС6, ЧС200 ЭПЭ2 В/И, ЭП1 в/и., ЭП2 в/и	$10^{-6}$	Не принимаемый в расчет

		Уровень последствий			
Уровень возможности	Возможность возникновения пожара	Незначительный	Несущественный	Критический	Катастрофический
частое событие	$P_{\text{пост}}^{\text{пожара}} > 0,1$	Нежелательный риск	Нежелательный риск	Недопустимый риск	Недопустимый риск
вероятное событие	$0,1 < P_{\text{пост}}^{\text{пожара}} \leq 10^{-2}$	Допустимый риск	Нежелательный риск	Недопустимый риск	Недопустимый риск
случайное событие	$10^{-3} < P_{\text{пост}}^{\text{пожара}} \leq 10^{-2}$	Допустимый риск	Допустимый риск	Нежелательный риск	Недопустимый риск
редкое событие	$10^{-4} < P_{\text{пост}}^{\text{пожара}} \leq 10^{-3}$	Не принимаемый в расчет риск	Допустимый риск	Нежелательный риск	Нежелательный риск
крайне редкое событие	$10^{-5} < P_{\text{пост}}^{\text{пожара}} \leq 10^{-4}$	Не принимаемый в расчет риск	Не принимаемый в расчет риск	Допустимый риск	Допустимый риск
маловероятное	$P_{\text{пост}}^{\text{пожара}} \leq 10^{-5}$	Не принимаемый в расчет риск			

Рисунок Б.5 – Матрица пожарных рисков постов электрической централизации

Таблица Б.2 – Уровни влияния последствий пожара на посту ЭЦ

Класс ж.д. станции	1 блок I (B)	2 блок I (C)	3 блок I-V (П)	4 блок I-II (Г, Т), I (O)	5 блок III-IV (Г, Т)	6 блок V (Г, Т) III-V (M)
внеклассные	катастрофический	катастрофический	катастрофический	катастрофический	критический	критический
1-й класс	катастрофический	катастрофический	катастрофический	критический	критический	несущественный
2-й класс	катастрофический	катастрофический	катастрофический	критический	несущественный	несущественный
3-й класс	катастрофический	катастрофический	критический	несущественный	несущественный	незначительный
4-й класс	катастрофический	критический	несущественный	несущественный	незначительный	незначительный
5-й класс	критический	критический	несущественный	несущественный	незначительный	незначительный



Рисунок Б.6 – Шкала индивидуального риска тяговой подстанции по фактическому состоянию

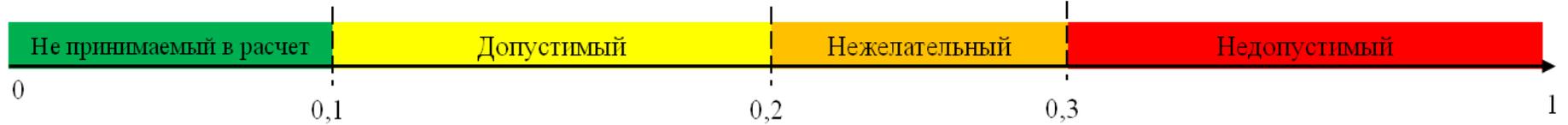


Рисунок Б.7 – Шкала уровня пожарного риска для тепловозов серий 2ТЭ10, 2ТЭ116, 2М62, ТЭП70, ТЭМ2

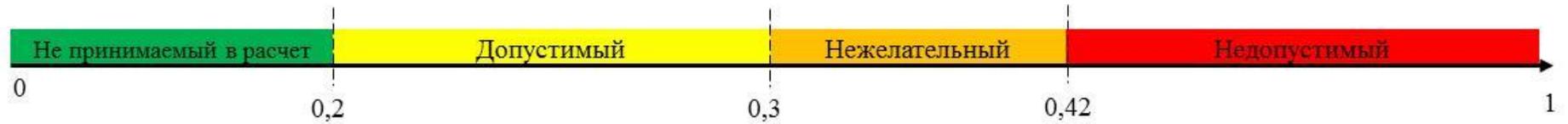


Рисунок Б.8 – Шкала уровня пожарного риска для тепловозов серии 3ТЭ10

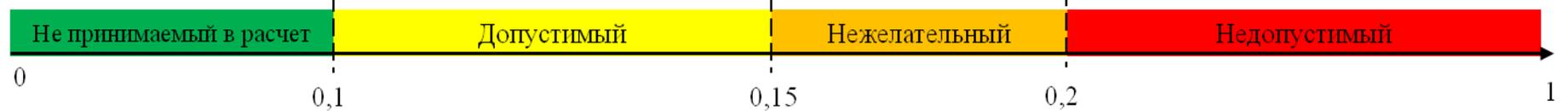


Рисунок Б.9 – Шкала уровня пожарного риска для тепловозов серии ЧМЭ3 и другие

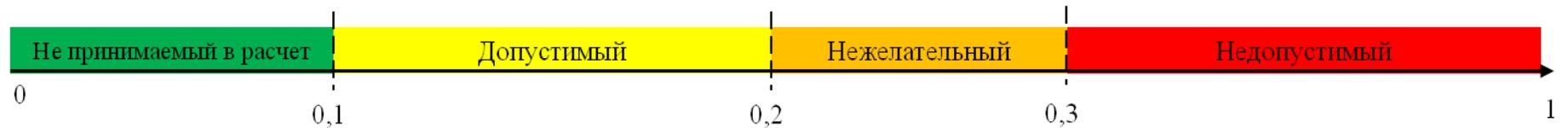


Рисунок Б.10 – Шкала уровня пожарного риска для электровозов серий ВЛ80, ВЛ10, ВЛ60, ЧС4, ЧС2

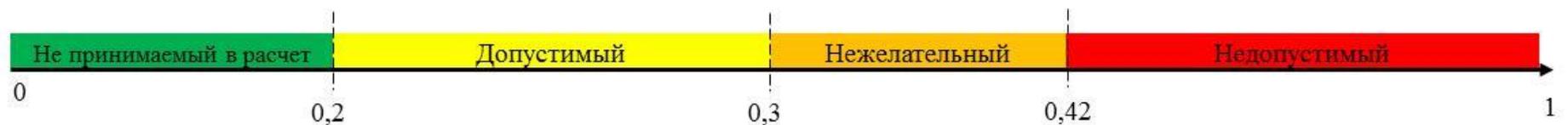


Рисунок Б.11 – Шкала уровня пожарного риска для электровозов серии ВЛ85, ВЛ11

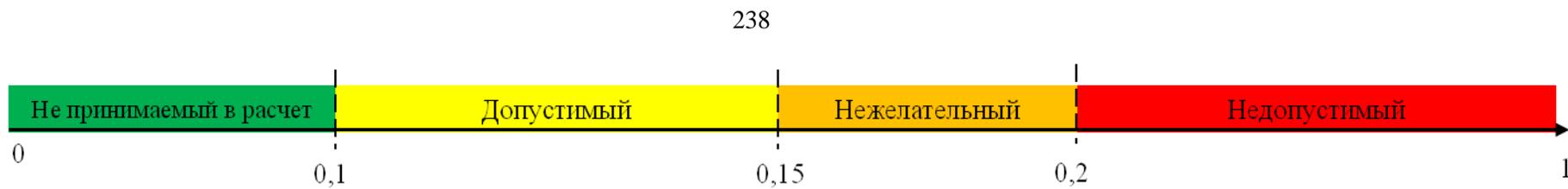


Рисунок Б.12 – Шкала уровня пожарного риска для электровозов серии ЭП1М и другие

**Приложение В Классификаторы и контрольно-оценочные карты  
неисправностей стационарных и передвижных объектов железнодорожного  
транспорта, влияющих на величину пожарного риска**

В Таблице В.1 приведен классификатор нарушений требований пожарной безопасности для зданий железнодорожных вокзалов ОАО «РЖД». В Таблице использованы следующие обозначения:

а) ППР – Правила противопожарного режима в Российской Федерации (тоже в Таблице П.3.2);

б) 123-ФЗ – Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ;

в) ППБО 109-92 - Правила пожарной безопасности на железнодорожном транспорте" (утв. МПС РФ 11.11.1992 N ЦУО-112);

г)  $R_{НС}^{КД}$  - вероятность появления пожароопасной ситуации из-за нарушения требования пожарной безопасности.

В Таблице В.2 приведён классификатор нарушений требований пожарной безопасности по отношению к системам инженерного обеспечения в информационно-вычислительном центре.

В Таблице В.3 приведен перечень объектов проведения аудита поста ЭЦ. В Таблицах В.4 и В.5 приведены классификаторы нарушений требований пожарной безопасности и пожароопасных состояний (в форме контрольно-оценочной карты, применяемой при проведении аудита) для постов электрической централизации и тяговых подстанций соответственно. В Таблице В.6 приведены правила проставления баллов опасности для состояний постов ЭЦ.

В Таблице В.7, приведен классификатор пожароопасных состояний (в форме контрольно-оценочной карты, применяемой при проведении аудита) контрольно-оценочная карта тягового подвижного состава (пример для тягового электродвигателя № 1 тепловоза серии 2ТЭ116).

Таблица В.1 –Классификатор нарушений ТПБ по отношению к конструкции ПИО, задействованных в производственном процессе железнодорожного вокзала (пример)

Пункт нормативного документа	Р <sub>НС</sub> <sup>КД</sup>	Пункт нормативного документа	Р <sub>НС</sub> <sup>КД</sup>	Пункт нормативного документа	Р <sub>НС</sub> <sup>КД</sup>
<b>Документ 123-ФЗ</b>					
<b>статья 18</b>	0,9	<b>статья 19</b>	0,9		
<b>ППР</b>					
<b>23 а)</b>	0,1	<b>115 а)</b>	0,8	<b>357 д)</b>	0,8
<b>42 а)</b>	0,9	<b>141</b>	0,8	<b>359</b>	0,9
<b>42 в)</b>	0,8	<b>145</b>	0,9	<b>395 б)</b>	0,6
<b>42 д)</b>	0,7	<b>157</b>	0,8	<b>401</b>	0,7
<b>42 з)</b>	0,6	<b>159</b>	0,8	<b>426 а)</b>	0,9
<b>51</b>	0,7	<b>164</b>	0,8	<b>430 а)</b>	0,7
<b>52</b>	0,6	<b>166</b>	0,8	<b>430 б)</b>	0,7
<b>53</b>	0,4	<b>173</b>	0,8	<b>430 в)</b>	0,8
<b>73</b>	0,8	<b>270</b>	0,5	<b>430 д)</b>	0,7
<b>83 з)</b>	0,9	<b>273</b>	0,7	<b>430 е)</b>	0,7
<b>90</b>	0,2	<b>297</b>	0,7	<b>430 ж)</b>	0,7
<b>95 б)</b>	0,9	<b>298</b>	0,8	<b>430 з)</b>	0,8
<b>95 в)</b>	0,9	<b>299</b>	0,9	<b>430 и)</b>	0,7
<b>96</b>	0,9	<b>305</b>	0,8	<b>430 м)</b>	0,4
<b>97</b>	0,9	<b>311</b>	0,1	<b>430 е)</b>	0,5
<b>99</b>	0,8	<b>313</b>	0,3	<b>436 г)</b>	0,7
<b>100</b>	0,6	<b>314</b>	0,2	<b>4436 д)</b>	0,9
<b>101</b>	0,7	<b>353 а)</b>	0,8	<b>439</b>	0,9
<b>ППБО 109-92</b>					
<b>Глава 1</b>					
<b>4.2</b>	0,8	<b>4.5</b>	0,9	<b>6.8</b>	0,7
<b>4.3</b>	0,8	<b>4.10</b>	0,8	<b>6.41</b>	0,54
<b>4.6</b>	0,6	<b>5.6</b>	0,6	<b>6.43</b>	0,5
<b>4.7</b>	0,9	<b>5.18</b>	0,8	<b>6.55</b>	0,3
<b>Глава 2</b>					
<b>2.16</b>	0,8	<b>5.37 а)</b>	0,25	<b>8.3</b>	0,8
<b>2.23</b>	0,9	<b>6.9</b>	0,8	<b>8.7</b>	0,9
<b>4.3</b>	0,9	<b>7.4</b>	0,2	<b>8.10</b>	0,9
<b>5.30</b>	0,9	<b>8.2</b>	0,9	<b>9.8</b>	0,3
<b>Глава 3</b>					
<b>1.6 а)</b>	0,8	<b>1.33</b>	0,9	<b>1.71</b>	0,8
<b>1.6 б)</b>	0,8	<b>1.39</b>	0,99	<b>1.76</b>	0,8
<b>1.6 в)</b>	0,8	<b>1.44</b>	0,8	<b>1.78</b>	0,9
<b>1.6 г)</b>	0,8	<b>1.51</b>	0,9	<b>1.81</b>	0,6
<b>1.7</b>	0,9	<b>2.18</b>	0,9	<b>1.82</b>	0,9
<b>1.8</b>	0,7	<b>1.53</b>	0,8	<b>1.83</b>	0,8
<b>1.11</b>	0,99	<b>1.59</b>	0,9	<b>1.84</b>	0,99
<b>1.12</b>	0,9	<b>1.60</b>	0,9	<b>2.5</b>	0,6
<b>1.18</b>	0,9	<b>1.62</b>	0,9	<b>2.6</b>	0,8

<b>1.22</b>	0,9	<b>1.63</b>	0,9	<b>2.22</b>	0,99
<b>1.30</b>	0,9	<b>1.64</b>	0,9		

Таблица В.2 – Классификатор нарушений требований пожарной безопасности по отношению к системам инженерного обеспечения в информационно-вычислительном центре (пример)

Объект осмотра (потенциальный источник огня)	Действия	Нарушение требований пожарной безопасности	№ Вида нарушения	Обозначение вероятности	Вероятность появления пожароопасной ситуации
Линзовые прожекторы, прожекторы и софиты <i>Основание: п.44 ППР от 25.04.2012 №390</i>	Оценить целостность	Целостность нарушена	21	Р <sub>НС</sub> <sup>к.э.</sup>	0,9
			22	Р <sub>НС</sub> <sup>м.э.</sup>	0,9
			23	Р <sub>НС</sub> <sup>э.э.</sup>	0,9
	Оценить расстояние до горючих конструкций и материалов	Горючие конструкции и материалы находятся близко	22	Р <sub>НС</sub> <sup>м.э.</sup>	0,9
			23	Р <sub>НС</sub> <sup>э.э.</sup>	0,8
Воздушные линии электропередач <i>Основание: п.41 ППР от 25.04.2012 №390</i>	Оценить целостность	Целостность нарушена	21	Р <sub>НС</sub> <sup>к.э.</sup>	0,5
			24	Р <sub>НД</sub> <sup>о.э.</sup>	0,5
			23	Р <sub>НС</sub> <sup>э.э.</sup>	0,5
	Оценить место прокладки	Прокладка осуществлена над горючими материалами (в т.ч. горючими кровлями, навесами)	26	Р <sub>НД</sub> <sup>с.э.</sup>	0,8
			22	Р <sub>НС</sub> <sup>м.э.</sup>	0,8
			23	Р <sub>НС</sub> <sup>э.э.</sup>	0,7

Таблица В.3 – Перечень объектов проведения аудита поста ЭЦ

Объекты осмотра		Вид объекта	Тип объекта
<b>Группа объектов (наименование КОК):</b> Основная документация в области пожарной безопасности			
1	Организационно-распорядительный документ о разграничении ответственности за обеспечение пожарной безопасности по помещениям за структурными подразделениями функциональных филиалов ОАО «РЖД»	СОПБ	ОТД
2	Декларация (паспорт) соответствия требованиям пожарной безопасности постов ЭЦ, ДЦ, ГАЦ (за исключением домов связи)		
3	Инструкция о мерах пожарной безопасности		
4	Инструкция о порядке действий дежурного персонала при получении сигналов о пожаре и неисправности систем пожарной автоматики		

Объекты осмотра		Вид объекта	Тип объекта		
5	Перечень, разрешенных к эксплуатации бытовых электроприборов по каждому помещению, утвержденные балансодержателем здания				
6	Исполнительная документация принципиальных и монтажных схем на установки и системы противопожарной защиты объекта				
7	Журнал «документация по техническому обслуживанию систем пожарной автоматики»				
8	Выписка из организационно-распорядительного документа РЦКУ о порядке и местах хранения запаса огнетушащего вещества для автоматических установок пожаротушения				
9	Акты ежеквартальных проверок соблюдения противопожарного режима на посту ЭЦ				
10	Акты проведения тренировок (не реже 1 раза в полугодие) по действиям работников при возникновении пожара				
11	Акты ежеквартальных проверок работоспособности систем и средств противопожарной защиты объекта (автоматических (автономных) установок пожаротушения, автоматических установок пожарной сигнализации, установок систем противодымной защиты, системы оповещения людей о пожаре, средств пожарной сигнализации, противопожарных дверей, противопожарных и дымовых клапанов, защитных устройств в противопожарных преградах) Основание: пункт 61 ППР от 25.04.2012 № 390				
12	Протокол ежегодных испытаний по контролю качества огнезащитной обработки конструкций из древесины. Основание: пункт 21 ППР от 25.04.2012 № 390 Форма протокола: приложение Е к ГОСТ Р 53292-2009				
13	Протокол эксплуатационных испытаний 1 раз в 5 лет пожарных лестниц и ограждений на крышах (покрытиях) Основание: пункт 24 ППР от 25.04.2012 № 390 Форма протокола: приложение Е к ГОСТ Р 53254-2009				
14	Журнал учета наличия, периодичности осмотра и сроков перезарядки огнетушителей, а также иных первичных средств пожаротушения Основание: пункт 478 ППР от 25.04.2012 № 390 Форма журнала: произвольная				
15	Акт проверки работоспособности источников внутреннего противопожарного водопровода Основание: пункт 55 ППР от 25.04.2012 № 390				
16	Акт проверки работоспособности источников наружного противопожарного водопровода Основание: пункт 55 ППР от 25.04.2012 № 390				
17	Акт (протокол) измерения 1 раз в 3 года сопротивления изоляции проводов, кабелей и заземляющих устройств				
<b>Группа объектов (наименование КОК):</b> Противопожарный режим в административно-бытовых помещениях					
1	Табличка с номером телефона для вызова пожарной охраны			СОПБ	СПЗ
2	Проходы от рабочих мест до входной двери				
3	Нокаут - вопросы				
<b>Группа объектов (наименование КОК):</b> Противопожарный режим в помещениях производственного и складского назначения					
1	Табличка с номером телефона для вызова пожарной охраны	СОПБ	СПЗ		

Объекты осмотра		Вид объекта	Тип объекта
2	Категория по взрывопожарной и пожарной опасности, а также класс пожароопасной зоны		
3	Проходы от рабочих мест до входной двери		
4	Нокаут - вопросы		
<b>Группа объектов (наименование КОК):</b> Конструкции здания с нормируемым пределом огнестойкости (противопожарные преграды)			
1	Противопожарные преграды (стены, перегородки, перекрытия)	СОПБ	СПЗ
2	Заполнение проемов в противопожарных преградах (двери, окна, люки и т.д.)		
<b>Группа объектов (наименование КОК):</b> Пути эвакуации			
1	Количество эвакуационных выходов из подвальных и цокольных этажей	СОПБ	СПЗ
2	Количество эвакуационных выходов с наземных этажей		
3	Количество эвакуационных выходов из помещения		
4	Размеры эвакуационных путей и выходов (ширина, высота)		
5	Состояние путей эвакуации		
6	Содержание путей эвакуации		
<b>Группа объектов (наименование КОК):</b> Осветительные и оконечный электрические устройства			
1	Розетки	ПИО	СИО
2	Выключатели		
3	Светильники		
4	Электроприборы (бытовая и орг. техника)		
5	Нокаут - вопросы		
<b>Группа объектов (наименование КОК):</b> Электрические сети и кабельная продукция			
1	Электрические сети	ПИО	СИО
2	Распаечные и распределительные коробки		
3	Нокаут - вопросы		
<b>Группа объектов (наименование КОК):</b> Электрощиты и электрошкафы			
1	Коммутационные устройства (автоматические выключатели, плавкие вставки))	ПИО	СИО
2	Корпус электрощита, электрошкафа		
3	Контактные соединения выводов аппаратов с внешними проводниками (болтовые, клемные). (на предмет чрезмерного нагрева)		
4	Заземляющая клемма		
5	Нокаут - вопросы		
<b>Группа объектов (наименование КОК):</b> Система приточно-вытяжной вентиляции			
1	Оборудование приточно-вытяжной вентиляции	ПИО	СИО
<b>Группа объектов (наименование КОК):</b> Система отопления			
1	Электроконвекторы	ПИО	СИО
2	Оборудование встроенной котельной (котельные на твердом топливе)		
<b>Группа объектов (наименование КОК):</b> Чердачное помещение, конструкция кровли			
1	Деревянные конструкции чердачного помещения и кровли	СОПБ	СПП
2	Металлические конструкции кровли		
3	Содержание чердачного помещения		
<b>Группа объектов (наименование КОК):</b> Внешние ограждающие конструкции			
1	Наружные стены	СОПБ	СПЗ
<b>Группа объектов (наименование КОК):</b> Противопожарный водопровод			

Объекты осмотра		Вид объекта	Тип объекта
1	Внутренний пожарный кран	СОПБ	СПЗ
2	Пожарный гидрант (наружный противопожарный водопровод)		
<b>Группа объектов (наименование КОК): Первичные средства пожаротушения</b>			
1	Огнетушитель	СОПБ	СПЗ
<b>Группа объектов (наименование КОК): Система пожарной сигнализации</b>			
1	Технические средства установки (пожарные извещатели, линии, кабели, приборы контроля и управления)	СОПБ	СПЗ
2	Прибор приемно-контрольный пожарный (ППКП)		
<b>Группа объектов (наименование КОК): Системы пожаротушения</b>			
1	Технические средства установок пожаротушения (баллоны, трубопровод, распылители, оросители, приборы контроля и управления)	СОПБ	СПЗ
2	Прибор пожарный управления		
3	Защищаемое помещение в целом		
<b>Группа объектов (наименование КОК): Система оповещения и управления эвакуацией</b>			
1	Технические средства системы (громкоговорители и приборы световой индикации)	СОПБ	СПЗ
2	Прибор пожарный управления		
<b>Группа объектов (наименование КОК): Заземляющее устройство и молниезащита поста ЭЦ</b>			
1	Заземляющее устройство	СОПБ	СПЗ
2	Молниезащита		
<b>Группа объектов (наименование КОК): Оборудование ЖАТ</b>			
1	Панель питания	ПИО	ТС
2	Щит выключения питания	ПИО	ТС
3	Релейные стивы с монтажом		
4	Заземление оборудования	ПИО	ТС
5	Приборы защиты от перенапряжений		
6	Нокаут - вопросы		
<b>Группа объектов (наименование КОК): Оборудование ДГА</b>			
1	ДГА	ПИО	ТС
2	Нокаут - вопросы		
<b>Группа объектов (наименование КОК): Оборудование связи</b>			
1	Устройства автоматического ввода-резерва	ПИО	ТС
2	Оборудование и устройства связи		
3	Прочее оборудование		
4	Техническая документация		
5	Нокаут - вопросы		
<b>Группа объектов (наименование КОК): Устройства ТУ-ДУ дистанций электроснабжения</b>			
1	Коммутационные устройства	ПИО	ТС
2	Корпус электрощита, электрошкафа		
3	Контактные соединения выводов аппаратов с внешними проводниками		
4	Заземляющая клемма		
5	Нокаут - вопросы		
<b>Группа объектов (наименование КОК): Кабели технических средств СЦБ, связи и электроснабжения</b>			
1	Ввод кабелей	ПИО	ТС
2	Недействующие кабели	ПИО	ТС

Объекты осмотра		Вид объекта	Тип объекта
3	Ввод кабелей связи, СЦБ и электроснабжения	ПИО	ТС
4	Кабельные ниши (каналы)	ПИО	ТС
5	Нокаут - вопросы	ПИО	ТС
<b>Группа объектов (наименование КОК): Напольное оборудование</b>			
1	Опоры контактной сети, мосты, путепроводы и напольные устройства СЦБ, расположенные в зоне «А» контактной сети и ВЛ электроснабжения	ПИО	ТС
2	Элементы обратной тяговой сети (дрессель-трансформаторы, соединители, перемычки, междупутные обвязки, устройства отсоса тягового тока и т. д.)	ПИО	ТС

Таблица В.4 – Контрольно-оценочная карта «Осветительные и оконечные электрические устройства, электроприборы» (для поста ЭЦ, пример)

Объект осмотра	Действия	Состояние объекта	Отметка о состоянии	Тип состояния	Баллы опасности
Розетки <i>Основание:</i> п. 42 «б» ППР от 25.04.2012 № 390	Оценить целостность	Целостность не нарушена		Б	0
		Цельность нарушена		А	5
	Оценить качество крепления	Закреплена надежно		Б	0
		Слабое крепление		А	3
	Проверить соответствие монтажа проектным решениям и нормативным документам по пожарной безопасности	Соответствует		Б	0
	Не соответствует		А	5	
Выключатели <i>Основание:</i> п. 42 «б» ППР от 25.04.2012 № 390	Оценить целостность	Целостность не нарушена		Б	0
		Целостность нарушена		А	5
	Оценить качество крепления	Закреплен надежно		Б	0
		Слабое крепление		А	3
	Проверить соответствие монтажа проектным решениям и нормативным документам по пожарной безопасности	Соответствует		Б	0
	Не соответствует		А	5	
Светильник и <i>Основание:</i> п.п. 42 «в», 343 ППР от 25.04.2012 № 390	Оценить соответствие конструкции установленным изготовителем и нормативными документами параметрам	Соответствует		Б	0
		Не соответствует		А	5
	Оценить расположение светильника относительно оборудования и хранящихся материалов (0,5 м)	Нет нарушения		Б	0
		С нарушением		А	5
	Оценить состояние (мерцание, загрязненность и т.д.)	Нет нарушения		Б	0
	С нарушением		А	3	

Объект осмотра	Действия	Состояние объекта	Отметка о состоянии	Тип состояния	Баллы опасности
	Оценить качество крепления	Закреплен надежно		Б	0
		Слабое крепление		А	3
Электроприборы (бытовая и орг. техника) Основание: п. 42 «а» ППР от 25.04.2012 № 390	Визуально оценить состояние целостности корпуса и токоведущих частей	Нет нарушения		Б	0
		С нарушением		А	5

Таблица В.5 – Контрольно-оценочная карта объектов тяговой подстанции (пример)

Наименование объекта (ПНО)	$i$	Элемент/узел объекта/условий его эксплуатации /технического обслуживания	Пожароопасное состояние элемента/узла/условий эксплуатации/технического обслуживания	$j$	Отметка	$P_{ij}$	$\alpha_i \cdot 10^5$
Выпрямляющий трансформатор	1	Уровень износа	Имеются непригодные к эксплуатации трансформаторы, включенные в работу	1		1	10
	2	Протокол испытания	Трансформатор не годен к эксплуатации	1		0,8	10
			Испытания не проводятся	2		0,2	
	3	Нагрузка на трансформатор	Недопустимая	1		0,8	9,12
Приближается к предельному значению			2		0,2		
Измерительный трансформатор	1	Бак	Уровень масла выше нормы	1		0,10	3,3
			Уровень масла ниже нормы	2		0,05	
			Течь масла имеется незначительная	3		0,05	
			Критическая течь масла	4		0,80	
	2	Релейная защита и автоматика выключателей	Релейная защита имеется, неисправна	1		0,95	9,17
			Имеются непригодные к эксплуатации выключатели, включенные в работу	2		0,50	
	3	Заземление трансформаторов	Имеется заземление трансформаторов в одной точке	1		0,10	9,3
			Заземление отсутствует	2		0,90	
	4	Испытание заземления трансформатора	Испытания не проводятся	1		0,8	10
			Испытания проводятся с нарушением сроков	2		0,2	
	5	Система обдува трансформаторов	Система обдува неисправна	1		0,5	0,3
			Термосигнализаторы отсутствуют (неисправны)	2		0,5	

Наименование объекта (ПНО)	$i$	Элемент/узел объекта/условий его эксплуатации /технического обслуживания	Пожароопасное состояние элемента/узла/условий эксплуатации/технического обслуживания	$j$	Отметка	$P_{ij}$	$\alpha_i \cdot 10^5$
	6	Периодическое ТО, ТР, КР	ТО проводятся с нарушение периодичности	1		0,1	7,52
			ТР проводятся с нарушение периодичности	2		0,2	
			Недостаточно для проведения полного цикла	3		0,3	
			КР не проводятся	4		0,4	
	7	Гравийная засыпка	Гравийная засыпка загрязнена	1		1	1
	8	Хроматографический анализ масла	Имеются превышения концентраций негорючих газов	1		0,2	10
			Имеются превышения концентраций горючих газов	2		0,8	
	9	Контактные соединения	Наличие мест нагрева контактных соединений ошиновки	1		1	9,17
	10	Трансформаторы	Имеются непригодные к эксплуатации трансформаторы, включенные в работу	1		1	9,17
	11	Протокол испытания	Трансформатор не годен к эксплуатации	1		0,8	9,17
			Испытания не проводятся	2		0,2	
	12	Нагрузка на трансформатор	Недопустимая	1		0,8	9,12
Приближается к предельному значению			2		0,2		

Таблица В.6 – Баллы опасности частоты появления инициирующего воздействия

Баллы опасности	Правила
5	состояние является непосредственной причиной пожара
4	состояние объекта затрудняет эвакуацию или приводит к нагреву материалов и оборудования при эксплуатации объекта
3	при ухудшении состоянии объекта (усилении имеющегося состояния) приведёт к нагреву материалов и оборудования
2	состояние объекта способствует распространению горения или нагрева
1	объект не соответствует нормам, но его состояние не приведет к появлению огня, нагреву или созданию условий распространения пожара при эксплуатации
0	Состояние объекта, соответствующие всем нормам

Таблица В.7 – Контрольно-оценочная карта тягового подвижного состава (пример для тягового электродвигателя № 1 тепловоза серии 2ТЭ116)

№	Часть узла	№	Пожароопасное состояние	Отметка о наличии	$P_i^{КОК}$	$\Delta_{ТО/ТРj}$	Отметка об устранении	$\partial_i$
1	ТЭД № 1	1.1	Клицы повреждены		0,067	0,088		0,061
		1.2	Грязь и подтеки масла		0,067			0,061
		1.3	Целостность корпуса и подшипниковых щитов нарушена		0,4			0,36
		1.4	Проходные втулки кабелей повреждены		0,057			0,052
		1.5	Оболочки кабеля повреждены		0,057			0,052
		1.6	Кабели ненадежно закреплены в клице		0,067			0,061
		1.7	Закопченность, загрязнения маслом и пылью коллекторных пластин		0,057			0,052
		1.8	Общее состояние: трещины, перекосы, оплавления и изломы		0,057			0,052
		1.9	Пальцы щеткодержателей с трещинами и повреждениями		0,057			0,052
		1.10	Изоляторы на пальцах сидят неплотно		0,057			0,052

№	Часть узла	№	Пожароопасное состояние	Отметка о наличии	$P_i^{\text{КОК}}$	$\Delta_{\text{ТО/ТР}j}$	Отметка об устранении	$\partial_i$
		1.11	Пальцы щеткодержателей со следами пробоя изоляции		0,057			0,052
$P_j^{\text{КОК}} = \sum_{i=1}^i P_i^{\text{КОК}}$								
$P_j^{\text{узел}} = P_j^{\text{КОК}} + \Delta_{\text{ТО/ТР}j} - P_j^{\text{КОК}} \cdot \Delta_{\text{ТО/ТР}j}$								
$P_{j\text{ком}}^{\text{узел}} = P_j^{\text{узел}} - \sum_{i=1}^i \partial_i$								

**Приложение Г Пример графа состояний пожарной опасности кабелей в помещении стационарного объекта и расчета вероятностей перехода в опасное состояние**

**Задача:** найти вероятность перехода из состояния  $S_0$  (провода и кабели не повреждены) в состояние  $S_4$  (нагрев из-за роста переходного сопротивления) для графа состояний, представленного на Рисунке Г.1).

**Дано:**

$S$  – полное множество состояний объектов,  $S_{И} = \{S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ , Таблица Г.1;

$S_H$  – состояния системы, при которых отсутствует опасность для имущества, жизни, здоровья работников, третьих лиц и соблюдены требования технической, технологической документации, условий эксплуатации,  $S_H = \{S_0\}$ , Таблица Г.1;

$S_{риск}$  – подмножество состояний, дестабилизирующих пожарную безопасность (факторов риска),  $S_{риск} = \{S_1, S_2, S_3\}$ , Таблица Г.1;

$\bar{S}_{ПБ}$  – подмножество опасных состояний),  $\bar{S}_{ПБ} = \{S_4, S_5\}$ , Таблица Г.1.

Таблица Г.1 – Множества состояний объекта

Множество	№	Обозначение	Описание	Нарушенный нормативный документ
$S_H$	0	$S_0$	Кабели/провода не повреждены	
$S_{риск}$	1	$S_1$	Открыто проложенные кабели/провода (без защитных оболочек/труб/коробов) проложены в местах, где возможны механические повреждения	ПУЭ 2.1.47
	2	$S_2$	Крутые изгибы, микро-повреждения (не видимые повреждения изоляции)	
	3	$S_3$	Эксплуатация кабеля/провода с видимым нарушением изоляции	ППР 42а)
$(\bar{S}_{ПБ})$	4	$S_4$	Нагрев из-за роста переходного сопротивления	
	5	$S_5$	Короткое замыкание и оплавление изоляции, искры КЗ	

В Таблице Г.2 приведена матрица переходных вероятностей.

Таблица Г.2 – Матрица переходных вероятностей

		Состояния						$\Sigma$
		0	1	2	3	4	5	
с о с т о я н и я	0	0,7	0,3	0	0	0	0	<b>1</b>
	1	0,5	0	0,3	0,2	0	0	<b>1</b>
	2	0	0	0,7	0	0,3	0	<b>1</b>
	3	0	0	0	0,3	0,2	0,5	<b>1</b>
	4	0	0	0,3	0	0,7	0	<b>1</b>
	5	0	0	0	0	0	1	<b>1</b>

На Рисунке Г.1 приведен граф состояний.

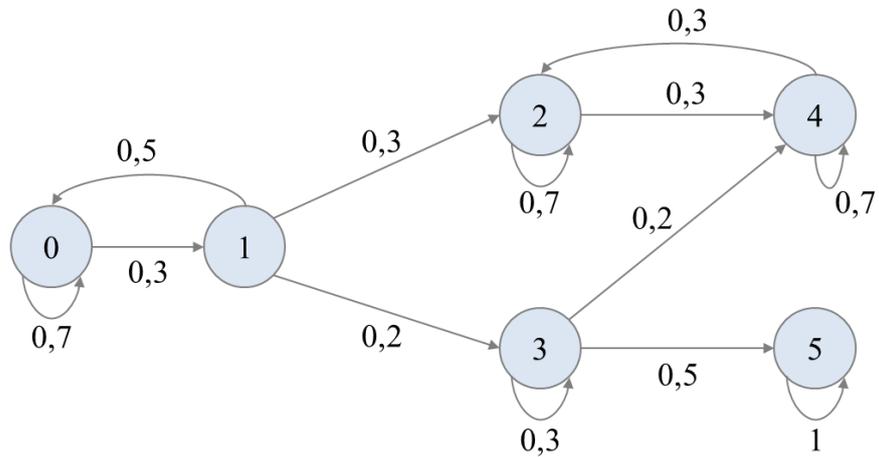


Рисунок – Г.1

**Решение:**

1) Определение путей перехода из вершины 0 в вершину 4

Путь 1:  $S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_4$

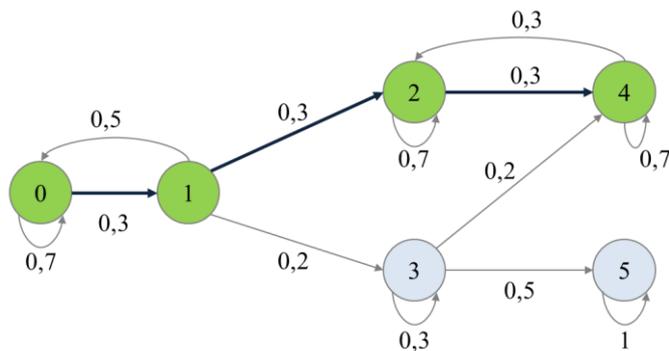


Рисунок – Г.2

Путь 2:  $S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_3 \rightarrow S_4$

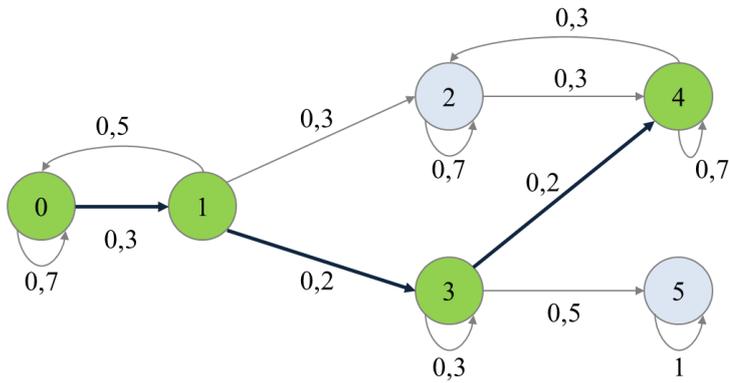


Рисунок – Г.3

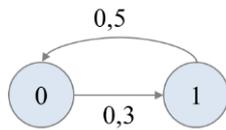
2) Расчёт весов пути от вершины 0 до вершины 4

$$l_1^{04} = p_{01} \cdot p_{12} \cdot p_{24} = 0,3 \cdot 0,3 \cdot 0,3 = 0,027$$

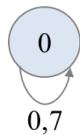
$$l_2^{04} = p_{01} \cdot p_{13} \cdot p_{34} = 0,3 \cdot 0,2 \cdot 0,2 = 0,012$$

3) Определение контуров графа

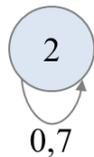
Контур 1:  $S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_0$



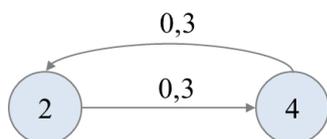
Контур 2:  $S_0 \rightarrow S_0$



Контур 3:  $S_2 \rightarrow S_2$



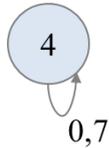
Контур 4:  $S_2 \rightarrow S_4$



Контур 5:  $S_3 \rightarrow S_3$



Контур 6:  $S_4 \rightarrow S_4$



Контур 7:  $S_5 \rightarrow S_5$



4) Расчёт весов контуров

$$C_j = \prod p_{ij} \cdot p_{ji}$$

В Таблице Г.3 приведен расчет контуров графа состояний.

Таблица Г.3 – Расчёт весов контуров

№	Код контура	Вершины	Вид	Формула	Вес контура, $C_i$	Контур с опасными состояниями
1	$C_1$	$S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_0$	 A cycle between two nodes labeled '0' and '1'. An arrow from 0 to 1 is labeled '0,5', and an arrow from 1 to 0 is labeled '0,3'.	$p_{01} \cdot p_{10} = 0,5 \cdot 0,3$	0,15	
2	$C_0$	$S_0 \rightarrow S_0$	 A circular node labeled '0' with a curved arrow pointing back to itself, labeled '0,7' below it.	$p_{00} = 0,7$	0,7	
3	$C_2$	$S_2 \rightarrow S_2$	 A circular node labeled '2' with a curved arrow pointing back to itself, labeled '0,7' below it.	$p_{22} = 0,7$	0,7	
4	$C_4$	$S_2 \rightarrow S_4$	 A cycle between two nodes labeled '2' and '4'. An arrow from 2 to 4 is labeled '0,3', and an arrow from 4 to 2 is labeled '0,3'.	$p_{24} \cdot p_{42} = 0,3 \cdot 0,3$	0,09	V
5	$C_3$	$S_3 \rightarrow S_3$	 A circular node labeled '3' with a curved arrow pointing back to itself, labeled '0,3' below it.	$p_{33} = 0,3$	0,3	
6	$C_{4.4}$	$S_4 \rightarrow S_4$	 A circular node labeled '4' with a curved arrow pointing back to itself, labeled '0,7' below it.	$p_{44} = 0,7$	0,7	V
7	$C_5$	$S_5 \rightarrow S_5$	 A circular node labeled '5' with a curved arrow pointing back to itself, labeled '1' below it.	$p_{55} = 1$	1	V

5) Расчёт веса разложения  $\Delta G_{\overline{SP}}$

5.1) Определение перечня вершин, участвующих в расчёте веса разложения:

Вершины: 0, 1, 2, 3.

5.2) Определение контуров, участвующих в расчёте веса разложения:

Контуров:  $C_0, C_1, C_2, C_3$ .

5.3) Определение не соприкасающихся пар контуров:

Пара 1:  $C_1$  и  $C_2$  ( $C_1 * C_2 = 0,105$ )

Пара 2:  $C_1$  и  $C_3$  ( $C_1 * C_3 = 0,045$ )

Пара 3:  $C_0$  и  $C_2$  ( $C_0 * C_2 = 0,49$ )

Пара 4:  $C_0$  и  $C_3$  ( $C_0 * C_3 = 0,21$ )

Пара 5:  $C_2$  и  $C_3$  ( $C_2 * C_3 = 0,21$ )

5.4) Определение не соприкасающихся троек контуров:

Тройка 1:  $C_1$  и  $C_2$  и  $C_3$  ( $C_1 * C_2 * C_3 = 0,0315$ )

Тройка 2:  $C_0$  и  $C_2$  и  $C_3$  ( $C_0 * C_2 * C_3 = 0,147$ )

5.5) Не соприкасающихся четверок, пятерок и т.п. нет.

5.6) Расчёт веса разложения\*

$$\Delta G_{\overline{SP}} = 1 - (0,7 + 0,15 + 0,7 + 0,3) + (0,105 + 0,045 + 0,49 + 0,21 + 0,21) - (0,0315 + 0,147) = 0,0315$$

6) Расчёт веса разложения графа  $\Delta G_1^k$  пути 1 (без опасных вершин и вершин, находящихся на 1-ом пути)

6.1) Определение перечня вершин, участвующих в расчёте веса разложения:

Вершины: 3.

6.2) Определение контуров, участвующих в расчёте веса разложения:

Контуров:  $C_3$ ,

6.3) Определение не соприкасающихся пар контуров:

нет

6.4) Определение не соприкасающихся троек контуров:

нет

6.5) Не соприкасающихся четверок, пятерок и т.п. нет.

6.6) Расчёт веса разложения:

$$\Delta G_1^k = 1 - (0,3) = 0,7$$

7) Расчёт веса разложения графа  $\Delta G_2^k$  пути 2 (без опасных вершин и вершин, находящихся на 2-ом пути)

7.1) Определение перечня вершин, участвующих в расчёте веса разложения:

Вершины: 2

7.2) Определение контуров, участвующих в расчёте веса разложения:

Контур:  $C_2$ ,

7.3) Определение не соприкасающихся пар контуров:

нет

7.4) Определение не соприкасающихся троек контуров:

нет

7.5) Не соприкасающихся четверок, пятерок и т.п. нет.

7.6) Расчёт веса разложения:

$$\Delta G_1^k = 1 - (0,7) = 0,3$$

8) Расчёт вероятности перехода из состояния  $S_0$  (провода и кабели не повреждены) в состояние  $S_4$  (нагрев из-за роста переходного сопротивления):

$$P_{04} = \frac{\sum_{f \in \overline{S_p}} \sum_k l_k^{if} \cdot \Delta G_f^k}{\Delta G_{\overline{S_p}}} = \frac{0,027 \cdot 0,7 + 0,012 \cdot 0,3}{0,0315} = \frac{0,0225}{0,0315} = 0,71$$

9) Аналогичным образом рассчитывается вероятность перехода из состояния  $S_0$  (провода и кабели не повреждены) в состояние  $S_5$  (короткое замыкание и оплавление изоляции, искры КЗ).

$$P_{05} = \frac{\sum_{f \in \overline{S_p}} \sum_k l_k^{if} \cdot \Delta G_f^k}{\Delta G_{\overline{S_p}}} = \frac{0,03 \cdot 0,3}{0,0315} = \frac{0,009}{0,0315} = 0,29$$

10) В Таблице Г.4 приведены результаты расчета вероятностей перехода из состояния «Кабели/провода не повреждены» в опасные состояния.

Таблица Г.4 – Результаты оценки

Переход в опасное состояние:	Вероятность перехода
нагрев из-за роста переходного сопротивления	0,71
Короткое замыкание и оплавление изоляции, искры КЗ	0,29

**Приложение Д Выдержки из патента на изобретение «Способ определения пожарной опасности технических объектов железнодорожного транспорта и система для его реализации»**

Реферат.

Изобретение относится к средствам предупреждения пожаров для определения пожарной опасности технических объектов. Система содержит центр пожарной безопасности, включающий центральный процессор, формирователь контрольно-оценочных карт, блок памяти и базу данных, а также АРМ оператора аудита, включающее процессор с блоком ввода/вывода и монитором, средства диагностики в виде соответствующих контрольно-диагностических комплексов и контрольных приборов, преобразователи, последовательно соединенные сумматор, первый, второй и третий вычислители и интерфейс связи для взаимодействия центрального процессора центра управления пожарной безопасностью с процессором автоматизированного рабочего места оператора аудита и с аппаратно-программными устройствами внешних систем. Достигается повышение эффективности определения пожарной опасности технического объекта. 2 н.п. ф-лы, 1 ил., 14 табл.

Пункт 2 формулы изобретения: система для определения пожарной опасности технического объекта, содержащая центр пожарной безопасности, включающий центральный процессор, входы/выходы которого подключены непосредственно к выходам/входам формирователя контрольно-оценочных карт, блока памяти и базы данных, автоматизированное рабочее место оператора аудита, включающее процессор с блоком ввода/вывода и монитором, средства диагностики в виде соответствующих контрольно-диагностических комплексов и контрольных приборов, преобразователи и последовательно соединенные сумматор, первый, второй и третий вычислители, выход последнего из которых подключен к входу процессора, выходом соединенного с входом сумматора, и интерфейс связи для взаимодействия центрального процессора центра управления пожарной

безопасностью с процессором автоматизированного рабочего места оператора аудита и с аппаратно-программными устройствами внешних систем, при этом выход каждого контрольно-диагностического комплекса и контрольного прибора через соответствующий преобразователь подключен к соответствующему входу процессора, другие входы/выходы которого соединены с входами/выходами первого и второго вычислителей.

Сущность изобретения в части системы поясняется чертежом на Рисунке Е.1, на котором представлена структурная схема варианта выполнения системы для определения пожарной опасности технического объекта, реализующей предлагаемый способ.

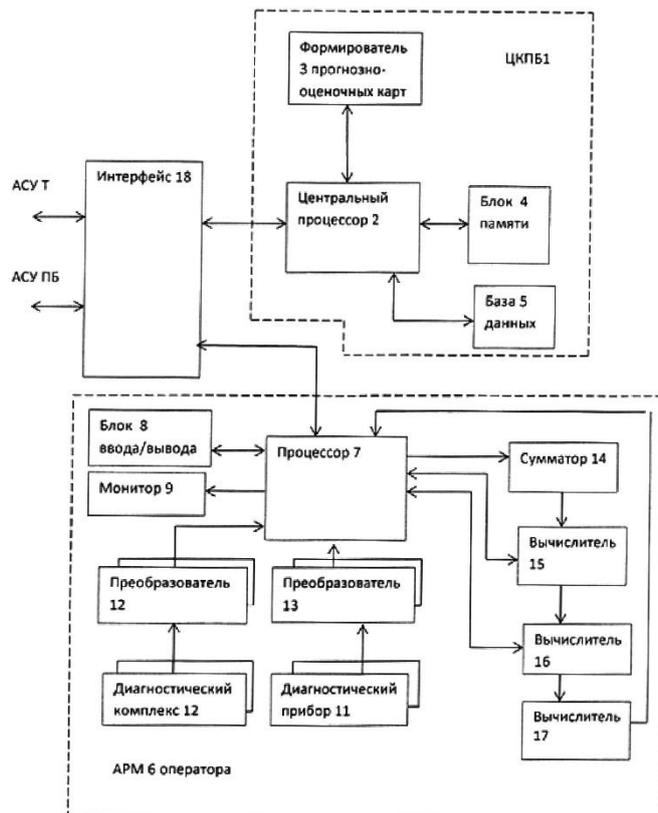


Рисунок Е.1 – Структурная схема варианта выполнения системы для определения пожарной опасности технического объекта, реализующей предлагаемый способ

Система для определения пожарной опасности технического объекта содержит центр 1 пожарной безопасности, включающий центральный процессор 2, входы/выходы которого подключены непосредственно к выходам/входам формирователя 3 контрольно-оценочных карт, блока 4 памяти и базы 5 данных, автоматизированное рабочее место 6 оператора аудита, включающее процессор 7 с блоком 8 ввода/вывода и монитором 9, средства диагностики в виде соответствующих контрольно-диагностических комплексов 10 и контрольных приборов 11, преобразователи 12 и 13, последовательно соединенные сумматор 14, первый, второй и третий вычислители 15, 16 и 17, выход последнего из которых подключен к входу процессора 7, выходом соединенного с входом сумматора 14, и интерфейс 18 связи для взаимодействия центрального процессора 2 центра 1 управления пожарной безопасностью с процессором 7 автоматизированного рабочего места оператора аудита и с аппаратно-программными устройствами внешних систем.

При этом выход каждого контрольно-диагностического комплекса 10 и контрольного прибора 11 через соответствующий преобразователь 12 и 13 подключен к входу процессора 7, другие входы/выходы которого соединены с входами/выходами вычислителей 15 и 16.

Центральный процессор 2 через интерфейс 18 связи взаимодействует с аппаратно-программными устройствами автоматизированной системы управления пожарной безопасностью на железнодорожном транспорте и автоматизированной системой управления локомотивным хозяйством.

## Приложение Е Акты внедрения результатов диссертационного исследования



**ОАО «РЖД»  
ДЕПАРТАМЕНТ ЭКОЛОГИИ, ОХРАНЫ  
ТРУДА И ПРОМЫШЛЕННОЙ  
БЕЗОПАСНОСТИ**

**АКТ**

29 апрель 2011 г. № 19

о внедрении (использовании) материалов  
диссертационного исследования Проневич Ольги Борисовны  
в ОАО «РЖД»

Настоящий акт составлен в подтверждение того, что результаты теоретических и опытных исследований, проведенных в диссертационной работе Проневич О.Б. «Автоматизированная система управления пожарными рисками при обеспечении безопасности движения на железнодорожном транспорте» применялись при оценке пожарных рисков постов электрической централизации.

По результатам оценки пожарных рисков на 32 постах электрической централизации железнодорожных станций второго класса составлен перечень технических средств, по отношению к которым при эксплуатации наиболее часто допускаются состояния, приводящие к повышению уровню пожарного риска.

Заместитель начальника Департамента



*А.А.Шарапов*  
А.А.Шарапов



**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»  
ДИРЕКЦИЯ ТЯГИ**

Басманный тупик, д.бА, строение 4  
г. Москва, 105064,  
Тел.: (499) 262-50-09, факс: (499) 262-13-56,  
E-mail: info-ct@center.rzd.ru, www.rzd.ru

26 МАРТ 2021 г. № 548

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

АКТ

**О внедрении (использовании) материалов диссертационного исследования Проневич Ольги Борисовны в Центральной дирекции тяги – филиале ОАО «РЖД»**

Комиссия в составе: Никольский К.Ю. – председатель комиссии;  
Москвин А.Г., Волков И.С. – члены комиссии.

Составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Автоматизированная система управления пожарными рисками при обеспечении безопасности движения на железнодорожном транспорте» используется при проведении весенних и осенних комиссионных осмотров тягового подвижного состава Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД» на этапе оценки пожарной опасности и допуска локомотивов в эксплуатацию.

Председатель комиссии:

Заместитель главного инженера  
Дирекции тяги

Член комиссии:

Ведущий инженер  
Дирекции тяги

Инженер  
Дирекции тяги



К.Ю. Никольский

А.Г. Москвин

И.С. Волков